

**MODELADO, SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN ANÁLISIS DE  
EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN HORNO LADRILLERO TIPO BÓVEDA  
EN CONDICIONES DE ESTADO ESTACIONARIO.**

**RAÚL ANDRES AREIZA MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2014**

**MODELADO, SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN ANÁLISIS DE  
EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN HORNO LADRILLERO TIPO BÓVEDA  
EN CONDICIONES DE ESTADO ESTACIONARIO.**

**RAÚL ANDRÉS AREIZA MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Directores:**

**Ph. D. JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ GIRALDO  
Ph. D JOSÉ IGNACIO HUERTAS CARDOZO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2014**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Pereira, Noviembre 20 de 2014**

*A mi madre por ser mi apoyo incondicional y a Dios por  
estar siempre en mi camino.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis Directores los Dres. Juan Esteban Tibaquirá y José Ignacio Huertas por haber creído en mí para hacer parte del Programa de Estancias para Jóvenes Investigadores de Alto Desempeño en el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA), lugar en donde se llevó a cabo esta investigación; infinitas gracias por la confianza depositada y por hacer mentores en mi proceso de formación.

Quiero agradecer a los miembros del CIMA por haberme brindado su apoyo durante mi estadía en México, de resaltar el Ingeniero Ivan Darío Arroyave, quien me orientó y asesoró durante gran parte del desarrollo de esta investigación y a los Ingenieros, Gina Ramírez, Michael Giraldo y Juan David Uribe que me brindaron su amistad y ayuda en el vecino país. También agradezco a mis compañeros del Grupo de Investigación en Gestión Energética, GENERGÉTICA, los Ingenieros Sebastián Ospina Castro y Luis Felipe Quirama por ser mi ejemplos a seguir y consejeros personales; y Finalmente a los grandes amigos que esta etapa de mi vida me permitió conocer que fueron un soporte fundamental en los momentos menos esperados y me enseñaron conforme a experiencias lo más valioso de la vida.

## CONTENIDO

GLOSARIO .....	12
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN .....	16
2. MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 HORNOS DE ALFARERÍA Y CERÁMICA.....	19
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ARTESANAL LADRILLERA.....	19
2.2.1 Hornos Intermitentes.....	19
2.2.2 Hornos Semicontínuos.....	20
2.2.3 Hornos Continúos. ....	20
2.2.4 Consolidado de las características de los hornos en la industria ladrillera colombiana. ....	22
2.3 PRODUCCIÓN POR HORNO EN EL TERRITORIO COLOMBIANO	23
2.4 GENERALIDADES DE LOS HORNOS LADRILLEROS TIPO BOVEDA. ....	23
2.5 ESTADO DEL ARTE .....	26
3. CONSTRUCCION DEL LA GEOMETRIA DEL HORNO EN FORMATO DIGITAL (CAD).....	29
4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)	34
4.1 MALLADO .....	34
5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN UTILIZANDO FLUENT.....	37
5.1 ESTUDIOS PREVIOS .....	37
5.1.1 Modelo previo 1: Honro ladrillero funcionando vacío.. ....	37
5.1.2 Modelo previo 2: Horno ladrillero con esfera sólida en su interior. .....	37
5.1.3 Modelo previo 3: Horno ladrillero con endague de ladrillos y carga parcial. ....	39
5.2. METODOLOGIA FINAL DE SIMULACION .....	41
5.2.1 Simulación del grupo de ladrillos y su endague mediante una masa porosa.....	42
6. SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN HORNO LADRILLERO TIPO BÓVEDA UTILIZANDO FLUENT (CFD) .....	47
6.1 BASE TEÓRICA: MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) .....	47
6.1.1 Generalidades. ....	47
6.1.2 Fluidodinámica computacional.....	48
6.1.3 Método de los volúmenes finitos.....	48
6.1.4 Modelos empleados para la resolución del problema.....	49

6.2 SIMULACIÓN CASO BASE: QUEMA DE CARBÓN A ATMOSFERA ABIERTA CON DISTRIBUCIÓN DE PISO EN “ESPINA DE PESCADO”.	51
6.2.1 Mallado .....	51
6.2.2 Condiciones de simulación. ....	53
6.2.3 Posprocesamiento .....	54
6.2.4 Análisis de resultados. ....	56
6.3 SIMULACIÓN CASO 1: HORNO CON QUE QUEMADOR, ENTRADA CERRADA Y PISO EN ESPINA DE PESCADO .....	57
6.3.1 Mallado. ....	59
6.3.2 Condiciones de simulación. ....	59
6.3.3 Posprocesamiento. ....	61
6.3.4 Análisis de resultados. ....	64
6.4 SIMULACIÓN CASO 2: HORNO CON QUE QUEMADOR, ENTRADA CERRADA, PISO EN ESPINA DE PESCADO.....	64
6.4.1 Mallado. ....	64
6.4.2 Condiciones de simulación. ....	64
6.4.3 Posprocesamiento. ....	66
6.4.4 Análisis de resultados. ....	67
6.5 SIMULACIÓN CASO 3: CASO BASE CON DISTRIBUCION DE PISO UNIFORME Y SALIDA LATERAL .....	69
6.5.1 Mallado. ....	70
6.5.2 Condiciones de simulación. ....	71
6.5.3 Posprocesamiento. ....	73
6.5.4 Análisis de resultados. ....	76
7. CONCLUSIONES .....	77
8. RECOMENDACIONES .....	78
BIBLIOGRAFÍA .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de la industrial ladrillera artesanal en Colombia año 2002[3].....	23
Figura 2 Horno tipo colmena con stoker como método de suministro de combustible.....	24
Figura 3 Horno tipo Colmena con parrillas como método de suministro manual de combustible. ....	24
Figura 4. Pared separadora del Horno colmena y cavidad donde se realiza la combustión.....	24
Figura 5. (Izquierda) Pared del horno y bóveda de un horno colmena en la vereda patio bonito en Nemocón, Cundinamarca. (Derecha) Endague de ladrillos para cocción. ....	24
Figura 6. Imagen real del conducto de abducción de gases en construcción del horno estudiado en este proyecto .....	25
Figura 7. Chimenea típica de un horno ladrillero tipo bóveda. Vereda Patio Bonito en Nemocón, Cundinamarca. ....	25
Figura 8. Curva típica de temperatura al interior de horno ladrillero tipo colmena. ....	26
Figura 9. Vista isométrico superior del modelo CAD 3D del Horno ladrillero.30	
Figura 10. Vista isométrico inferior del modelo CAD 3D del Horno ladrillero.31	
Figura 11. Modelo CAD 3D de las paredes (exteriores) y el domo o cúpula del horno ladrillero visto desde la parte superior.....	31
Figura 12. Modelo CAD 3D de las paredes (interiores), cavidades donde se ocurre la combustión y cámara interior en donde sucede la cocción de los ladrillos.....	32
Figura 13. Distribución del piso en “espina de pescado” y chimenea. ....	32
Figura 14. Vista Inferior del piso en “espina de pescado” y chimenea.....	33
Figura 15. Conducto para gases de escape y chimenea. ....	33
Figura 16. Mallado computacional del horno ladrillero en estudio. ....	35
Figura 17. Mallado computacional correspondiente al horno ladrillero (verde) y el fluido circundante al interior del mismo, aire (rojo). ....	36
Figura 18. Honro ladrillero mallado visto desde su parte posterior inferior. ..	36
Figura 19. Vectores de velocidad coloreados por magnitud (m/s) para el modelo previo 1, vista con chimenea.....	38
Figura 20. Vectores de velocidad coloreados por magnitud (m/s) para el modelo previo 1, vista solo cámara de cocción.....	38
Figura 21. Líneas de recorrido del aire al interior de la cámara de cocción coloreadas por magnitud e temperatura (K) para el modelo previo 2. ....	39
Figura 22. Contornos totales de temperatura (K) para el modelo previo 2. ..	39
Figura 23. Contorno de temperaturas del endague de ladrillos al interior del horno para el modelo previo 3. ....	40
Figura 24. Líneas de recorrido del fluido coloreadas por magnitud de temperatura (K) para el modelo previo 3. ....	40



Figura 25. Mallado de las cubos para evaluar la simplificación de modelo de ladrillos a una masa porosa. Entrada (azul) y Salida (rojo).....	43
Figura 26. Malla endague de ladrillos (izquierda) y malla masa porosa (derecha). ....	45
Figura 27. Mallado de la capa limite contenedora de los ladrillos y el fluido circundante que actúa como pared adiabática en Fluent.....	52
Figura 28. Zoom a la entrada de aire al Horno (azul), pared generadora de calor (amarillo) y capa limite (verde). ....	53
Figura 29. Malla de la masa porosa utilizada en todos las simulaciones. ....	53
Figura 30. Condiciones de la simulación Caso Base. En rojo la información obtenida después de la simulación. ....	53
Figura 31. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 120 segundos de operación del horno. ....	54
Figura 32. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 1800 segundos de operación del horno. ....	55
Figura 33. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 3600 segundos de operación del horno. ....	55
Figura 34. Horno Ladrillero tipo colmena con stoker y puertas. ....	57
Figura 35. Malla de la entrada (azul) y pared del horno (curuba). ....	59
Figura 36. Condiciones de la simulación Caso 1. En rojo la información obtenida después de la simulación. ....	60
Figura 37. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 120 segundos de operación del horno. ....	61
Figura 38. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 1800 segundos de operación del horno. ....	62
Figura 39. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 3600 segundos de operación del horno. ....	62
Figura 40. Condiciones de la simulación Caso 2. En rojo la información obtenida después de la simulación. ....	65
Figura 41. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 120 segundos de operación del horno. ....	66
Figura 42. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 1800 segundos de operación del horno. ....	66
Figura 43. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 3600 segundos de operación del horno. ....	67
Figura 44. Modelo CAD del Horno para el Caso 3 con acople lateral hacia la chimenea. ....	69
Figura 45. Modelo CAD del Horno para el Caso modificación en piso base. ....	69
Figura 46. Modelo CAD de la chimenea Lateral y variación de piso para el Caso 3. ....	70
Figura 47. Mallado del Horno y la masa porosa para el Caso 3. ....	70
Figura 48. Mallado del Horno para el Caso 3. ....	71
Figura 49. Condiciones de la simulación Caso 3. En rojo la información obtenida después de la simulación. ....	71

Figura 50. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 120 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo). .....	72
Figura 51. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 1800 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo). .....	73
Figura 52. Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 120 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo). .....	74

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de decisión para hornos en el sector ladrillero. ....	22
Tabla 2. Resultados arrojados por Fluent posteriores a la simulación. Caída de presión resaltada en rojo. ....	45
Tabla 3. Diagramas de resultados para el Caso Base.....	58
Tabla 4. Diagramas de resultados para el Caso 1.....	63
Tabla 5. Diagramas de resultados para el Caso 2.....	68
Tabla 6. Diagramas de resultados para el Caso 3.....	75

## GLOSARIO

**EELA:** Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para mitigar el Cambio Climático, es un programa de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, ejecutado por Swisscontact junto con sus socios en siete países de la Región. Busca contribuir a la mitigación del cambio climático a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de las ladrilleras artesanales de América Latina y mejorar la calidad de vida de los ladrilleros y la población en general.  
(<http://www.swisscontact.org.co/proyectos/eficiencia-energética-en-ladrilleras>)

**COSUDE:** Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (conocida en español como COSUDE, en inglés como SDC) es una agencia de la administración federal de Suiza y parte del Departamento Federal de Asuntos Exteriores. Junto con otras oficinas federales es responsable de la coordinación total de las actividades suizas de cooperación internacional, cooperación con Europa Oriental y ayuda humanitaria.  
(<http://www.cooperacion-suiza.admin.ch/colombia/>)

**SWISSCONTACT:** es una fundación independiente orientada al fomento económico para la cooperación internacional para el desarrollo. Con presencia en 27 países y alrededor de 800 empleados promueve, desde 1959, el desarrollo económico, social y medioambiental.  
(<http://www.swisscontact.org.co/#>)

**CAEM:** Corporación Ambiental Empresarial, filial de la Cámara de Comercio de Bogotá, es una organización sin ánimo de lucro fundada en 1983, que promueve la gestión ambiental empresarial eficiente y replicable con el fin incrementar la productividad y la creación de valor compartido.  
([http://www.corporacionambientalempresarial.org.co/nuestra\\_entidad.php?IdCat=20&IdSub=79](http://www.corporacionambientalempresarial.org.co/nuestra_entidad.php?IdCat=20&IdSub=79))

**CAIA:** Es una firma de consultoría dedicada a la prestación de servicios a nivel nacional e internacional, relacionados principalmente con la ingeniería ambiental.  
(<http://caiaingenieria.com/quienessomos.html>)

**CIMA:** El Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca, es un grupo multidisciplinario de investigadores con la experiencia, conocimientos e infraestructura necesaria para prestar a la industria servicios de asesoría, investigación aplicada, desarrollo tecnológico y capacitación en

las áreas relacionadas directa o indirectamente con la ingeniería automotriz.  
(<http://cima.tol.itesm.mx/espanol.html>)

**CFD:** Significa Dinámica de Fluidos Computacional y por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics, es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería.  
(Dr. John F. Wendt, 2009)

**CONVERGENCIA:** Es la capacidad que tiene un conjunto de ecuaciones algebraicas para representar la solución analítica de un conjunto de ecuaciones diferenciales, si es que esta existe. Las ecuaciones se dice que convergen si la solución numérica tiende a la solución analítica cuando el espaciado del mallado o el tamaño del elemento tienden a cero.  
(Rafael Ballesteros et al., 2003)

**ANSYS FLUENT®:** Es un software que contiene amplias capacidades de modelado físico necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión a la combustión en un horno, de columnas de burbujas a las plataformas petroleras, desde el flujo sanguíneo a los semiconductores, fabricación y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.  
(<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent>)

**ALTAIR HYPERMESH®:** Es un software preprocesador de elementos finitos de alto desempeño utilizado para preparar incluso los más grandes modelos, partiendo de importar una geometría CAD para exportar un análisis ejecutado para varias disciplinas. Este permite a los ingenieros recibir mayas de alta calidad con la máxima precisión en el menor tiempo posible. Hypermesh ofrece la más grande variedad de capacidades de mayado en sólidos en el mercado, incluyendo el dominio de métodos específicos tales como mallado SPH, NVH o CFD.  
(<http://www.altairhyperworks.com/Product,7,HyperMesh.aspx?AspxAutoDetectCookieSupport=1>)

## RESUMEN

La eficiencia energética y el proceso de cocción de los hornos tipo bóveda pueden ser mejorados considerablemente mediante la realización de modificaciones sobre las geometrías originales y características de este tipo horno o mediante la implementación de métodos de insuflación de aire caliente diferentes a los ya utilizados hoy en día; también mediante el uso de combustibles de menor coste medioambiental. Dichos conceptos han sido aplicados en diferentes ladrilleras artesanales en todo Latinoamérica con el fin de reducir tanto como sea posible los índices de emisiones pero alcanzando la mayor eficiencia que el sistema pueda alcanzar.

En este estudio, variedad de condiciones de funcionamiento han sido articuladas basadas en el principio de la impermeabilización de las paredes del horno y su entrada; estas fueron: la redistribución del piso en algunos casos y el uso de un Quemador como técnica para el suministro de aire de caliente para otros, considerando en todas las circunstancias la utilización del carbón como único combustible. La eficiencia energética del horno fue estimada utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés; Computational Fluid Dynamics), el cual modela el flujo de aire caliente y sus correspondientes tasas de transferencia de calor al interior de las cavidades del horno y a través de los ladrillos, modelados como una única masa porosa en su interior, para diferentes condiciones de operación.

Como resultado a lo anterior, se evidencio que el uso de un quemador en las entradas del horno como método para el aprovisionamiento de aire, aumenta significativamente la eficiencia energética del proceso, sin importar el tamaño del mismo. También, la instalación de paredes guía como piso soporte para la masa porosa contribuyó, al igual que la usanza de la recircularon de los gases de escape como método para precalentar el aire antes de entrar a la cámara de combustión del quemador, a mejorar la eficiencia energética del Horno.

Finalmente, Las técnicas de cocción y geometrías reformadas que mostraron los mayores aumentos de eficiencia energética fueron recomendadas como una nueva metodología a ser implementada en toda clase de ladrilleras artesanales con este tipo de hornos con el fin de lograr un ahorro medioambiental substancial así como fue corroborado con el modelo CFD utilizado en este estudio.

## ABSTRACT

The energetic efficiency of type vault kilns and its baking process can be considerably enhanced by carrying out adaptations in the original kiln's characteristic geometries or by implementing hot air insufflation methods different from the ones used today and also by the usage of lower environmental cost fuels. These concepts have been applied in different artisanal brickworks all around Latin America in order to achieve the lowest emission numbers as possible but the highest effectiveness that system can submit.

In this research, Different operating conditions were articulated based on the principle of complete tightness on kiln's walls and inlet. These were, the remade floor distribution in some cases and the use of a burner as an air supply technique for others, considering in all circumstances the combustion of carbon as sole fuel. The kiln's energetic efficiency was appraise using Computational Fluid Dynamics (CFD), which modeled the hot air flow and its corresponding heat transfer rates into the kiln and through the bricks, molded as a unique porous mass in it, for the diverse operation conditions. I

As a Result, t was observed that the use of a burner on the kiln's inlet as an air provide manner, increases significantly the process' energetic efficiency, no matter the kilns size. It was also identified that the usage of guiding walls under the brick porous mass as a floor support, contributed as well as the usage of recirculating exhaust gases with the purpose of preheating the air before the burner's combustion chamber, to ameliorate the kiln's energetic efficiency.

Finally, the reformed cooking procedures and geometries which displayed the best energetic efficiency improvements were recommended as new methodology to be implemented on all kinds of artisanal brickworks with this type of kilns in order to achieve a substantial environmental cost saving as it was corroborated by the CFD model used in this study.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ladrillo constituye el principal material en la construcción tanto de las antiguas como modernas viviendas y principales edificios que han venido siendo el pilar principal del desarrollo humano de la sociedad. Este material compuesto por masa de barro o arcilla cocida y con forma rectangular, encuentra su mejor aliado en el cemento. Juntos conforman la columna vertebral de la arquitectura moderna y han venido siendo valorados por sus cualidades decorativas y su alta disponibilidad a nivel mundial. También, se estima que los fabricantes de dicho material cerámico en América Latina, manufacturan entre el 30% y el 50% de la producción nacional de ladrillos, contribuyendo así al crecimiento del sector de la construcción que, en la mayoría de los países hispano americanos, ha sido uno de los motores más relevantes de su crecimiento económico en los últimos años.

Gracias a la elevada relevancia que dicho material posee y su alta producción a nivel continental, dichas organizaciones empresariales conocidas como ladrilleras artesanales se han vuelto una temática cada vez más controversial, especialmente en esta época actual donde el auge del cuidado ambiental ha ido ganando cada vez más fuerza. Es por ello que dicha práctica no industrializada en muchos países latinoamericanos, se ha convertido en el punto central de discusiones y estudios en el campo climático, energético y ambiental ya que indudablemente esta actividad representa una fuente constante de contaminación debido a la utilización de combustibles con alto costo ambiental como leña, llantas y plásticos, en hornos de baja eficiencia energética. Dicha industria, de igual manera afecta en gran medida la calidad del aire, promueve la deforestación y evidencia un incremento significativo en las causas del cambio climático, debido a alta generación de gases de efecto invernadero (GEI) que como ya se conoce afectan en gran medida la salud de la población en general.

En vista de dicho contraste entre la alta importancia de la producción ladrillera en Latinoamérica versus los altos niveles de contaminación que esta produce, se hace evidente la necesidad desarrollar metodologías más elaboradas para la producción de ladrillos en esta zona del continente americano. Donde la implementación de mejoras sustanciales en sus procesos de cocción cerámica, conciba mejoras a nivel climático y ambiental. Por ello, una gran variedad de entidades gubernamentales y privadas en países como Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, México, Perú, entre otros, han puesto en marcha planes de desarrollo energético-ambiental que involucren y promuevan la reducción de GEI en las ladrilleras artesanales de dichos países, mediante la introducción de estrategias previamente estudiadas que conlleven a un mejoramiento significativo de la



situación ambiental referente a dichas prácticas aun no industrializadas.

Colombia no se ha visto ajena a dicho fenómeno industrial y hoy en gran parte de los regiones del país buscan beneficiarse con proyectos para la mejora ambiental como lo es EELA (Eficiencia Energética En Ladrilleras Artesanales De América Latina para mitigar el cambio climático), el cual es un programa de la agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación COSUDE. Implementado por SWISSCONTACT (fundación suiza de cooperación para el desarrollo técnico) en los países donde las prácticas ladrilleras artesanales son ahora un tema trascendental. Este busca promover en dicha industria, por ahora artesanal, la reducción de los GEI mediante el uso hornos eficientes que usen energía más limpia, sean menos contaminantes, mejoren la calidad de los ladrillos y los ingresos de los ladrilleros.

A la vista de esta dificultosa situación ambiental la Corporación Ambiental Empresarial (CAEM, Filial de la Cámara de comercio de Bogotá) bajo el marco de la implementación del programa EELA en Colombia, en consultoría con la empresa CAIA Ingeniería LTDA. Y que a su vez esta última en Convenio con el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca, pide realizar un estudio a fondo de dicha situación ocurrente en nuestro país y así llegar a soluciones definitivas o aportes sustanciales que contribuyan en el proceso de definición de los proyectos de reconversión tecnológica a implementar en los ladrilleros de Nemocón Cundinamarca beneficiarios del proyecto de eficiencia energética en ladrilleras. Para ello se formula el proyecto que lleva por nombre “Modelado, Simulación Y Desarrollo De Un Análisis De Eficiencia Energética En Un Horno Ladrillero Tipo Bóveda En Condiciones De Estado Estacionario.” cuyo objetivo general a fin con lo tratado en esta sección es de realizar la modelación energética, mediante un software de elementos finitos, de un horno tipo colmena y de tres modificaciones en su geometría o materiales, para determinar las mejores condiciones de cocción y uso de combustible. Con el fin de alcanzar esta meta, es necesario realizar una serie de actividades, las cuales son:

- Obtener el diseño del horno base en formato digital, modelo CAD.
- Desarrollar una metodología de simulación en CFD de los procesos de transferencia de masa y calor al interior del horno que permita realizar las simulaciones en tiempos razonables (menores a 3 días de cómputo).
- Realizar las simulaciones del caso base.
- Realizar las simulaciones de condiciones de operación para identificar aquella de mayor eficiencia térmica.

El desarrollar una investigación desde el punto de vista energético en este tipo de artefactos un tanto rudimentarios, le permitiría al gobierno, empresas públicas y privadas, instituciones medioambientales y toda clase de entidades a fines en todo el continente a abrir nuevos caminos para analizar dicha problemática ambiental y llegar a conclusiones ingenieriles definitivas y acertadas, que realmente contribuyan a mitigar el cambio climático mundial mediante la implementación de tecnologías y procesos energéticos más eficientes (ciclos de quema, aislamiento , quemadores, etc.). También mediante el uso de combustibles menos contaminantes como el gas natural y porque no a través de la incidencia en las políticas públicas nacionales e internacionales relacionadas con la regulación de la producción de GEI que finalmente concluyan con la obtención de un producto con un valor agregado, amigable con el ambiente y que mejore tanto la calidad de vida de los residentes de los centros poblados como la de las familias participantes y productoras de dicho ladrillo artesanal.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 HORNOS DE ALFARERÍA Y CERÁMICA**

De acuerdo con el diccionario de términos cerámicos y de alfarería[1], los hornos de alfarería y cerámica son estructuras o fábricas de diversa complejidad, tamaño y apariencia, destinadas a la cocción de piezas de arcilla. En este también se afirma que el modelo tradicional es un recinto con techo de bóveda provisto de chimenea y una o más bocas para cargar el combustible, habitualmente leña, y los objetos que se quieran cocer.

En general, la función del horno, la cocción o cochura de material cerámico, es uno de los pasos fundamentales del proceso alfarero, el de mayor sentido mágico y el más determinante en la obtención del producto final.

### **2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ARTESANAL LADRILLERA**

En la industrial ladrillera actual existen infinidad de clases de hornos, los cuales dependiendo de la región o de la institución que les esté estudiando, son clasificados y denominados en formas diferentes; cabe resaltar también que hoy por hoy hay gran cantidad de hornos híbridos (con características tanto geométricas como funcionales de más de un solo horno), razón por la cual resulta tedioso realizar una tipificación que los incluya a todos o en su defecto encontrar una única caracterización para los hornos utilizados en toda esta industria pues actualmente no hay un ente regulador o una norma legal que los clasifique bajo un único estándar.

Para el ejecución de este proyecto se decidió utilizar la clasificación realizada por equipo técnico de EELA Colombia en el año 2011[2], pues es la más pertinente para este proyecto teniendo en cuenta que se realizó en el marco de la ejecución de dicho programa en Coloma. A continuación se enuncia dicha clasificación:

**2.2.1 Hornos Intermitentes.** Son artefactos de cámaras en arreglo tipo Batería (Individuales), en estos los productos, la instalación de la cocción y el proceso de enfriamiento ocurren en una posición fija durante el transcurso de todo el ciclo. Este proceso de lleva a cabo bajo el siguiente algoritmo:

1. Entrada de los productos
2. Precalentamiento
3. Cocción de los productos

4. Enfriamiento de los Productos
5. Salida de los Productos

La duración de cada una de estas operaciones varía significativamente con respecto al tipo de producto de cocer, el tipo de horno intermitente a utilizar y la naturaleza del proceso.

Dentro de esta parametrización funcional encontramos:

- Hornos de Fuego Dormido
- Hornos Pampa
- Horno Baúl
- Horno Colmena

**2.2.2 Hornos Semicontínuos.** Se entiende con esta denominación un horno semejante al continuo en cuanto a la carga del producto, sobre vagones y el recorrido de éstos en galería (túnel), pero que se diferencian del continuo porque todos los vagones cargados en 1 turno o 2 turnos de trabajo deben ser introducidos completamente en la galería, sin almacenamiento de reserva. Por lo tanto, el ritmo de avance de los vagones dentro del horno es igual al del cargue de vagones y durante las horas de descanso del personal, el funcionamiento de los hornos semicontínuos es similar al de un horno intermitente, con la diferencia importante de que la evacuación del aire ocurre siempre por el extremo de entrada de los vagones.

Como funcionamiento, los hornos semicontínuos se aproximan bastante más a los hornos continuos entre más tiempo duran los turnos de trabajo y el ciclo de cocción; son tanto más semejantes a los hornos intermitentes en el caso inverso. Los hornos semicontínuos son en ocasiones, agrupaciones de hornos intermitentes tendientes hacia una operación continua. Adicionalmente, se encuentran modelos como los tipos Vagón y Rápido Intermitente, de funcionamiento similar y forma rectangular.

Los hornos que operan bajo los parámetros de funcionamiento nombrados arriba son:

- Horno Vagón
- Horno Rápido Intermitente

**2.2.3 Hornos Continuos.** Los hornos continuos aparecieron como una solución más rentable en la fabricación de productos cerámicos. El funcionamiento continuo de los hornos se caracteriza por el desarrollo ininterrumpido de la cocción y la posibilidad de efectuar las diferentes etapas

sin variar el ritmo de la producción. Estos se clasifican en:

- Horno Hoffman
- Horno Hoffman de Bock
- Horno Bull's Trench Kiln (BTK)
- Horno Hoffman Abierto
- Horno Túnel
- Horno de Rodillos
- Horno de Cámaras Múltiples
- Horno Vertical VSBK
- Horno MK
- Horno MK-3

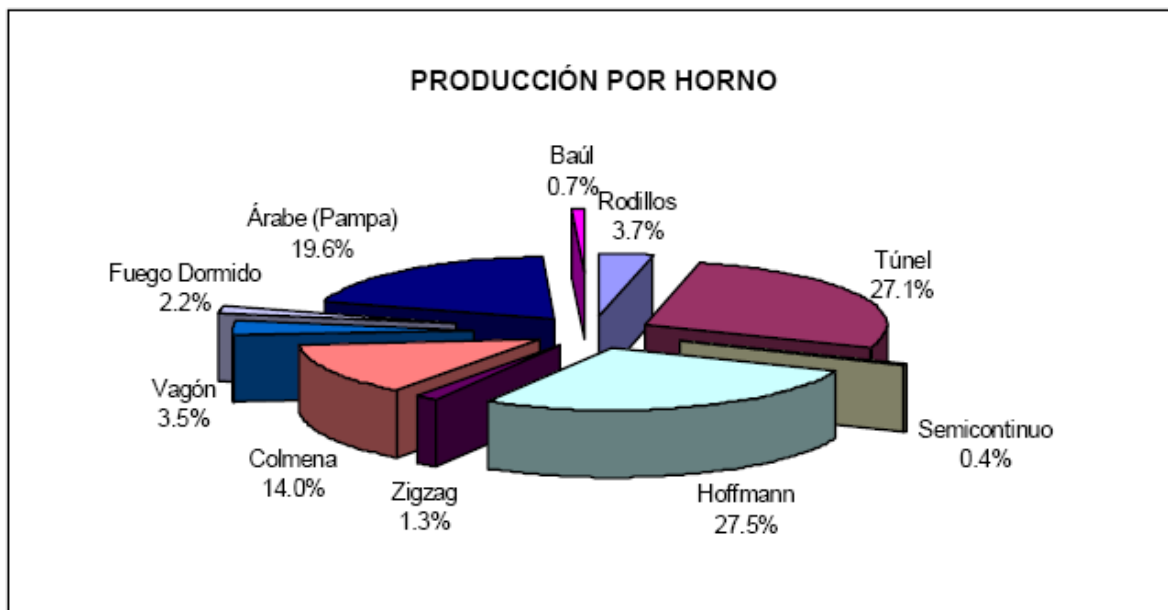
## 2.2.4 Consolidado de las características de los hornos en la industria ladrillera colombiana.

Criterios	Horno de Fuego dormido	Horno Pampa	Horno Baúl	Horno Colmena	Horno Vagón	Horno rápido Intermitente	Horno Hoffman	Horno Bull's Trench Kiln (BTK)	Horno Hoffman de Bock	Horno Hoffman abierto	Horno túnel	Horno de rodillos	Horno de cámaras Múltiples	Horno vertical VSBK	Horno Mk
Capacidad de horno	Regular	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Regular	Regular	Regular
Tipo de horno	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Semi continuo	Semi continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tiempo de combustible	Variable	Variable	Variable	Variable	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Variable	Fijo	Fijo
Permite cambiar a otro combustible	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	Si
Homogeneidad de temperatura	Regular	Regular	Regular	Meda	Meda	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Energía por Kg/ de ladrillo	Alta	Alta	Alta	Meda	Meda	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Permite recuperar calor para el secado	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si
Habilidad para producir tejas	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si
Habilidad para producir ladrillos con huecos	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si
Habilidad para producir ladrillos solidos	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Habilidad para producir baldosas	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si
Emissiones a la admosfera	Altas	Altas	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Bajas	Altas	Mediana	Mediana	Bajas	Bajas	Bajas	Bajas	Bajas
Posibilidad de cumplir las normas de emisiones	Bajas	Bajas	Bajas	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Bajas	Medianas	Medianas	Altas	Altas	Altas	Altas	Altas
Requerimiento de la calidad de mezcla	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Mediana	Mediana	Alto	Alto	Alto	Mediana	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Calidad de producto	Regular	Regular	Regular	Buena	Buena	Buena	Optima	Buena	Buena	Buena	Optima	Optima	Buena	Buena	Buena
Pérdida por producción	Alta	Alta	Alta	Regular	Baja	Baja	Regular	Regular	Regular	Regular	Baja	Baja	Baja	Regular	Regular
Inversión	Baja	Baja	Mediana	Mediana	Alta	Alta	Alta	Mediana	Mediana	Mediana	Alta	Alta	Mediana	Mediana	Mediana
Retorno de la inversión	Rápido	Rápido	Rápido	Rápido	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano
Requerimientos de la organización	Bajos	Bajos	Bajos	Bajos	Altos	Altos	Altos	Altos	Altos	Altos	Altos	Altos	Bajos	Altos	Bajos
Disponibilidad de réplica	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil	Fácil	Difícil	Difícil	Regular	Difícil	Regular
Disponibilidad cap. local para su construcción	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Experiencia de implementación a nivel regional	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
Modelo certificado para aplicar al mercado de carbono	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No

Tabla 1. Matriz de decisión para hornos en el sector ladrillero.

### 2.3 PRODUCCIÓN POR HORNO EN EL TERRITORIO COLOMBIANO

La Figura 1 [3] ilustra la cantidad de material cerámico fabricado por cada tipo de horno con respecto a la producción total anual registrada por esta industria en el año 2002.



**Figura 1.** Producción de la industrial ladrillera artesanal en Colombia año 2002[3].

Según el Proyecto EELA, los hornos del tipo Túnel, de Rodillos y Hoffman son considerados artefactos de combustión tecnificados ya que sus niveles de producción e índices de emisiones contaminantes, en contraste con los demás incluidos dentro de la clasificación descrita en el numeral 2.2, son mucho más favorables, con menores emisiones de GEI y alta capacidad de producción, sin olvidar que presentan mejores porcentajes de rendimiento térmico gracias a su técnica de recuperación de calor.

### 2.4 GENERALIDADES DE LOS HORNOS LADRILLEROS TIPO BOVEDA.

Estos son conocidos también como hornos redondos de llama invertida o tipo colmena, son hornos cerrados, intermitentes en donde a diferencia de los Pampa se puede regular mejor el tiro, el cual puede ser natural o forzado. La alimentación del material seco se realiza por una puerta lateral.

El suministro del combustible puede realizarse manualmente mediante parrillas colocadas en la pared del horno (Figura 3) **Error! No se encuentra**

l origen de la referencia.)[4]. o de forma automática mediante stoker (Figura 2)[5]. Están contruidos en forma de cámaras circulares con paredes y techo en bóveda de ladrillo; poseen hogares laterales distribuidos uniformemente donde se quema el combustible.



**Figura 3** Horno tipo Colmena con parrillas como método de suministro manual de combustible[4].



**Figura 2** Horno tipo colmena con stoker como método de suministro de combustible[5]

Una ventaja de estos hornos es que el combustible y sus residuos no están en contacto inmediato con el producto debido a la pared separadora y conductora de gases del hogar (Figura 4). La bondad de esta ventaja radica en que la coloración de los productos presenta tonalidades rojizas muy homogéneas y no se presentan productos tiznados por efectos del humo ni de las cenizas.



**Figura 4.** Pared separadora del Horno colmena y cavidad donde se realiza la combustión.



**Figura 5.** (Izquierda) Pared del horno y bóveda de un horno colmena en la vereda patio bonito en Nemocón, Cundinamarca. (Derecha) Endague de ladrillos para cocción.



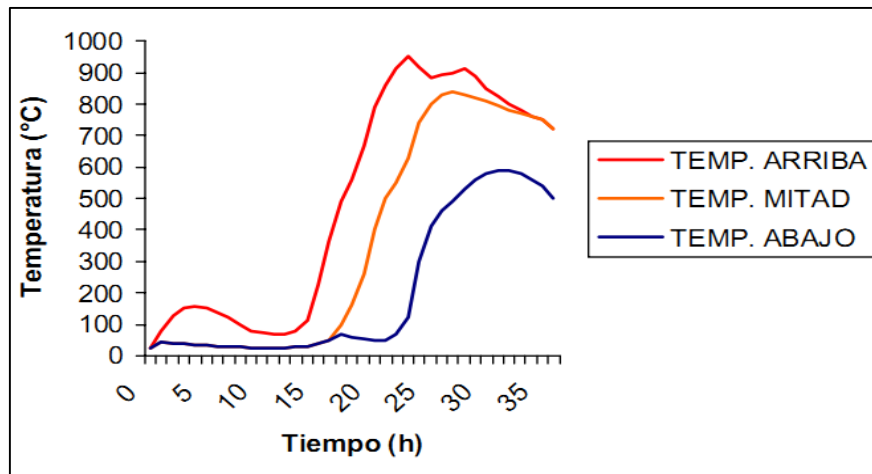
Los gases de combustión ascienden entre la pared del horno y la pared frontal del hogar, llegando hasta la bóveda (parte superior del horno, Figura 5) y luego son obligados a salir por la parte inferior del horno atravesando la carga de arriba hacia abajo (debido a esto son llamados hornos de llama Invertida) abandonando el horno por el conducto de abducción de gases que se encuentra en el centro del suelo del horno (Figura 6) y conduce los gases hacia la chimenea (Figura 7) [2]. La Figura 8 muestra la distribución típica de temperatura de este tipo de horno[6].



**Figura 6.** Imagen real del conducto de abducción de gases en construcción del horno estudiado en este proyecto



**Figura 7.** Chimenea típica de un horno ladrillero tipo bóveda. Vereda Patio Bonito en Nemocón, Cundinamarca.



**Figura 8.** Curva típica de temperatura al interior de horno ladrillero tipo colmena[6].

## 2.5 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, las prácticas relacionadas con la producción de ladrillo artesanal se llevan a cabo mediante una serie de actividades estrictamente ceñidas a variables como el tipo de horno, la disponibilidad de combustible en la región, el clima, la temporada del año, el monto de la producción, las tecnologías disponibles en el país, las normativas existentes, entre otras, dando como resultado incontables algoritmos de manufactura en los más de 45 mil hornos artesanales con los que cuenta sur y centro américa. Por ello hoy por hoy se encuentran en desarrollo variedad de programas que tienen como fin dar uniformidad a dicha “Industria”, buscando un beneficio económico, social y ambiental para toda la región. El más representativo de estos es, EELA (Eficiencia Energética En Ladrilleras Artesanales De América Latina para mitigar el cambio climático), el cual es un plan de la agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación COSUDE e implementado por SWISSCONTACT en alrededor de ocho países del sur y centro américa, que por medio del rediseño de hornos y estudios físicos de las practicas ladrilleras se encuentra promoviendo por todo el territorio de los diferentes países vinculados, la implementación de modelos integrales de eficiencia energética en base al aprendizaje generado por el intercambio entre otros países, como también a través de la incidencia en las políticas nacionales.

Debido a la extensa bibliografía existente relativa a esta problemática ambiental, especialmente proporcionada por el programa EELA referente a prácticas y estudios exclusivos para cada uno países donde se encuentre el proyecto en ejecución, y con el único objetivo de entrever las vías

previamente recorridas en el desarrollo de proyectos similares, determinar cómo ha sido tratado el tema, cómo se encuentra en el momento de realizar esta investigación y cuáles son las tendencias, se citan entonces los estudios más relevantes perpetrados por SWISSCONTACT que puedan servir como posible base de contraste con respecto a los resultados de este proyecto una vez terminado.

En el año 2011, swisscontact con la colaboración del instituto nacional de tecnología, el ministerio de ciencia, tecnología e innovación; y el gobierno federal de Brasil, realizó en Rio de Janeiro un trabajo de evaluación de desempeño térmico de hornos cerámicos acogido por el proyecto EELA. Para esto se seleccionó una empresa representativa de la región para la formalización de los experimentos, esta fue Cerámica Tavares, ubicada en el municipio de Parelhas perteneciente al estado brasileño de Río Grande del Norte. Esta agrupación contaba con una planta de producción de tejas, azulejos y bloques de sellado de numerosos tipos y dimensiones, empleando para ello seis hornos del tipo bóveda de características semejantes. El fin principal del trabajo fue calcular el consumo energético específico y el desempeño térmico general de dichos hornos, tomando como ejemplo la operación de los hornos denominados como 1 y 2 de su línea de producción, que operarían de forma conjunta en régimen de aprovechamiento de calor. Finalmente se buscó comparar la eficiencia térmica del sistema integrado por los dos hornos versus el modo tradicional, que vendría siendo la operación incomunicada de cada horno y sin aprovechamiento de calor. Como conclusiones de este estudio cabe resaltar que se encontró que las pérdidas de calor detectadas en los balances de energía de los hornos bóveda indicaron valores del orden de 70 y 80%, y en términos generales, a partir de los datos obtenidos en el ensayo, fue observado que el horno bóveda presenta buenas posibilidades de difusión de cerámica roja en la región del Seridó en función de la posibilidad de procesar combustibles, tales como aserrín, además de una mayor garantía de piezas de primera calidad y de una menor posibilidad de pérdidas, hecho que no ocurre con otro tipo de hornos como los tipo caieira y caipira, que son los que más predominan en la dicha localidad. También fue posible afirmar que un sistema compuesto por dos hornos operando secuencialmente con el aprovechamiento de calor proveniente de la quema del horno 2 direccionado para la carga del horno 1, proporciona una economía de 7.1% del consumo energético y 11.1% de beneficio en el rendimiento térmico. Además de eso, el tiempo total de operación para la quema de toda la masa producida en los dos hornos, se vio reducido gracias al sistema que asocia a los dos hornos, es decir, el beneficio de la productividad es evidente mediante una disminución del 20% en el tiempo de producción del sistema[7].

El año siguiente (2012), en la región de Cruzeta en el estado Rio del norte,

Brasil, se desarrolló el proyecto de nombre, “Evaluación comparativa de la inyección de aire forzado para combustión en la quema de artefactos cerámicos en hornos del tipo caipira”. El cual, conducido por el INT (Instituto Nacional de Tecnología) en el ámbito del proyecto EELA, selecciono una industria base para los ensayos, la cual contara con las condiciones pertinentes para el desarrollo del proyecto, esta fue Cerámica JRA, debido a que esta disponía de 5 hornos del tipo caipira con capacidad media de 40.000 piezas por quemada. Este proyecto tuvo por objetivo evaluar el desempeño de la quemada del horno denominado como número 4, operando sin y con el uso de inyección de aire forzado en la combustión, comprendiendo el monitoreo de las curvas de calentamiento, quemada y enfriamiento de los productos cerámicos. Adicionalmente, los hallazgos más significativos del estudio afirman que el uso de un ventilador adecuado para impulsar el aire hacia el interior del horno permite una economía de 29.0% de energía térmica, además de posibilitar una mayor manufactura de productos bien sinterizados, 17% más comparado con la prueba sin ventilador. En general, todos los datos recopilados después de la finalización del proyecto evidenciaron, que un menor consumo energético y una producción con mayor calidad, darían como resultado, ganancias económicas reveladoras para las empresas que adopten el empleo de aire inyectado a través de ventiladores como tecnología de mejoramiento en sus Hornos[8].

En conclusión, las ladrilleras artesanales en el territorio latinoamericano son reguladas de diversas maneras que varían de región a región, sin embargo, la literatura existente relacionada con el mejoramiento energético, combustibles y cuidados ambientales en este tipo de prácticas ladrilleras, evidencia estudios completamente divergentes los unos de los otros, ya que todos los resultados obtenidos a partir de las disímiles prácticas, investigaciones y pruebas, fueron efectuadas en escenarios específicos de operación, es decir, las condiciones ambientales características de cada región ladrillera como la presión y la temperatura ambiental, la humedad relativa del ambiente, los combustibles utilizados en el momento del estudio, el tipo de horno, etc., fueron diferentes, lo cual indicaría que tomar los datos arrojados de los estudios para llegar a conclusiones relevantes y definitivas que representen un aporte significativo a la temática en estudio, mediante análisis comparativos de dichas deducciones, sería una forma de proceder errada, ya que no es posible predecir el comportamiento de este tipo de artefactos (sin importar su geometría), si no existe una congruencia o semejanza entre las circunstancias sobre las cuales se consumaron los estudios. Por lo tanto, a pesar de ser muchos los trabajos divulgados inherentes a dicha problemática energético-ambiental, la temática del estudio de este tipo de hornos y su comportamiento a partir de herramientas que utilicen dinámica de fluidos computacional, CFD por sus siglas en inglés, es un estudio completamente nuevo en la región sur del continente americano.

### **3. CONSTRUCCION DEL LA GEOMETRIA DEL HORNO EN FORMATO DIGITAL (CAD)**

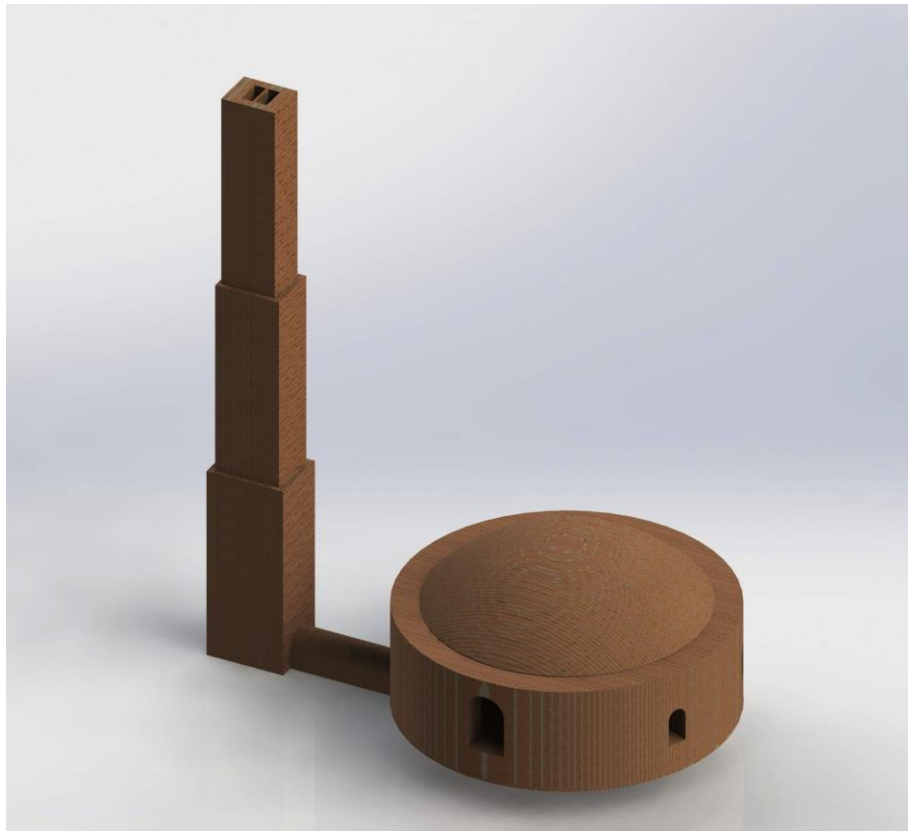
Con el fin de evaluar el diseño y las condiciones de operación de un honro ladrillero tipo bóveda que cuyos resultados posteriores a la simulación pudieran ser generalizables sobre a un conjunto artefactos de este mismo tipo sin importar sus correspondientes dimensiones; y debido a la gran variedad de formas y tamaños existentes aún dentro de la propia vereda Patio Bonito donde se focalizo este trabajo, se escogió un horno típico que está siendo construido de manera común hoy en día, como base de análisis. Las dimensiones constructivas fueron levantadas en diciembre de 2012 en terreno por parte de la firma CAIA ingeniería y entregada en enero del año siguiente al CIMA para la realización de las simulaciones fluido-dinámicas.

La referencia bibliográfica [9] contiene los datos tomados en campo para la construcción del modelo 3D del horno objetivo de análisis y sus respectivos planos originalmente provistos por CAIA; estos últimos no contienen la información a fin con los dos tipos de distribución de piso que fueron estudiados en este proyecto. Dicha información fue proporcionada por CAIA al CIMA también en los primeros meses del año 2013 y contenían las especificaciones para modelar un horno tipo colmena de ocho metros de diámetro interior y 9.60 metros de diámetro exterior. Los requerimientos señalados fueron:

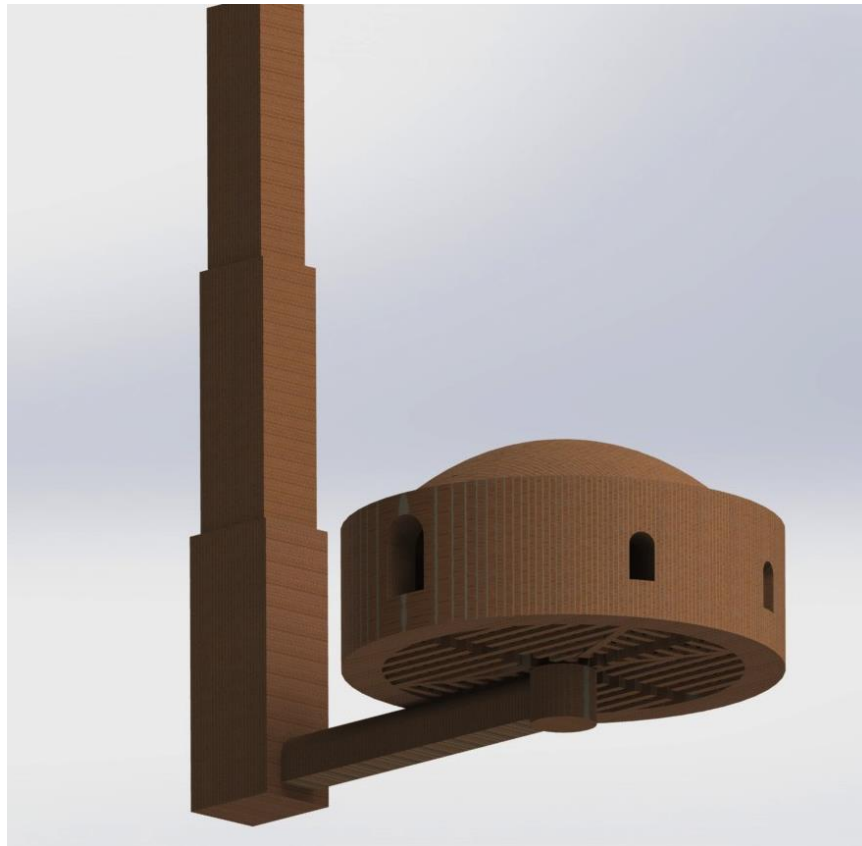
1. Paredón de 80 centímetros de ancho por tres metros de alto, de la siguiente manera un metro bajo el nivel de la tierra y dos metros sobre este, hasta el comienzo de la cúpula o bóveda.
2. Cúpula o bóveda de 1.80 metros de alto desde el arranque hasta que cierra. Con seis bramas laterales de seis a ocho pulgadas y una central de 10 pulgadas, están hechas en tubo de gres y su función es contribuir con el enfriamiento del horno.
3. Cuatro a seis hornillas de 60 centímetros de ancho por un metro de alto, las cuales llevarán un tubo de gres o metálico de cuatro pulgadas sobre cada una de ellas, para ser alimentadas con carbón coque o mineral molido, lo cual contribuye a disminuir la contaminación. Adicionalmente se puede alimentar de forma manual o con stoker. Las cuales llevan un emparrillado con rieles o H metálicas de seis pulgadas.
4. Piso o emparrillado, el cual puede ser en forma de espina de pescado o de túnel central, esto va de acuerdo a las necesidades y requerimientos del contratante.
5. Cinco Sunchos metálicos distribuidos en los dos metros que tiene de alto el horno desde el piso hasta el inicio de la bóveda.

6. Una o dos puertas de 1.8 metros de alto por un metro de ancho, de acuerdo a solicitud del contratante.
7. Cárcamo de tres metros de largo por 80 centímetros de ancho y 80 centímetros de alto con cámara o filtro de retención de partículas, que estará a 60 cm bajo el nivel del piso, cuenta con malla metálica de obstrucción “cortina”.
8. Chimenea de 18 metros de alto de la siguiente manera: hasta seis metros de alto, por 80 centímetros en el interior y dos metros en el exterior; hasta 12 metros de alto, por 80 centímetros en el interior y 1.8 metros en el exterior; hasta los 18 metros, por 80 centímetros en el interior y 1.6 metros en el exterior. Cada seis metros lleva una viga en concreto para reforzar la chimenea. Lleva tres filtros o niples metálicos de cuatro pulgadas de ancho por 60 centímetros de largo a la altura de 9 metros para medición isocinética. Se entrega con la plataforma metálica para medición, la cual se hará con base a las normas de la CAR.

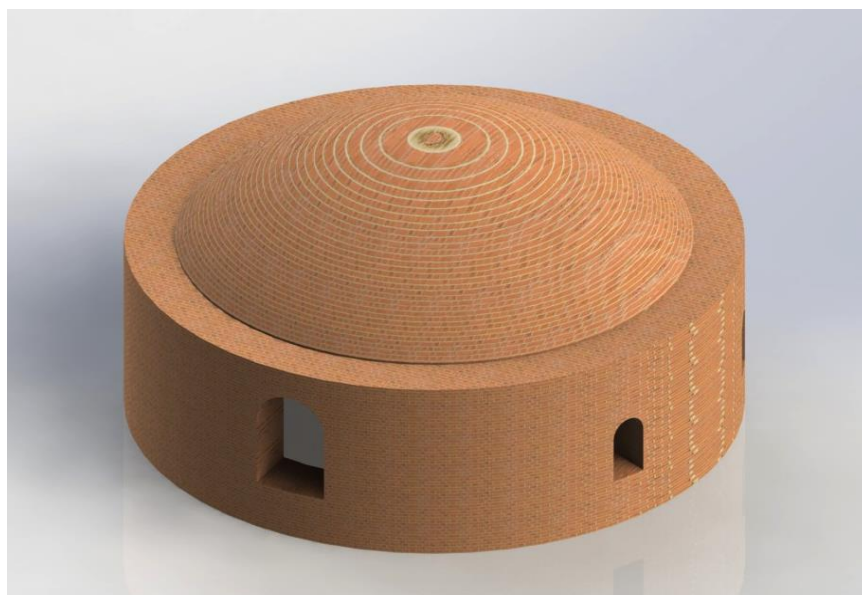
Finalmente, los Diseños tridimensionales del horno obtenidos haciendo uso del software CAD SolidWorks® versión 2013, se muestran a continuación:



**Figura 9.** Vista isométrico superior del modelo CAD 3D del Horno ladrillero.

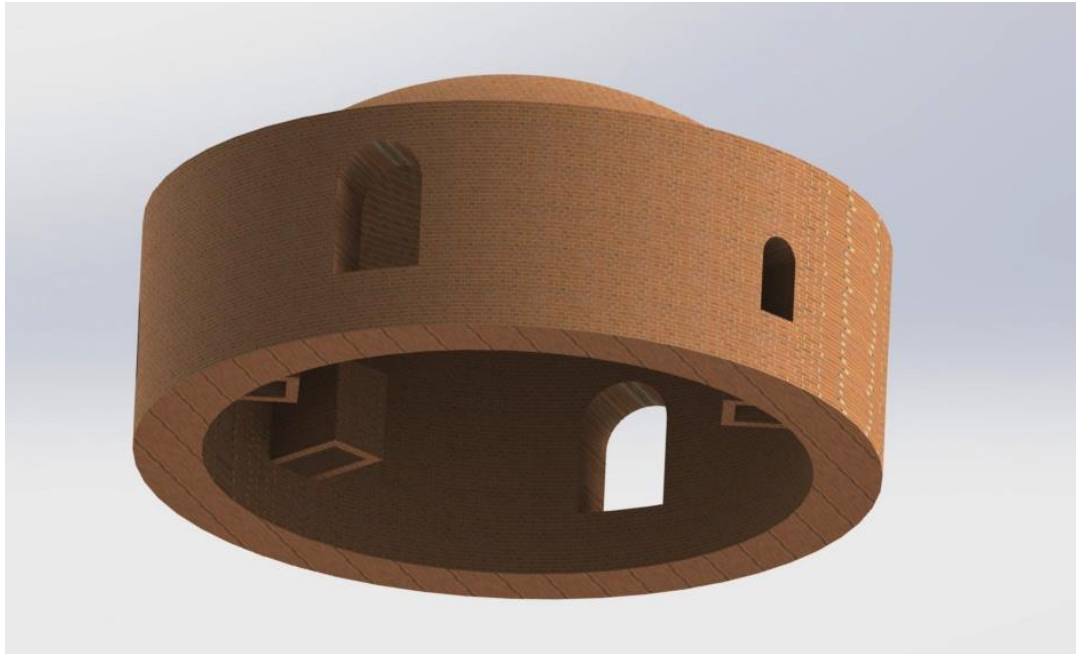


**Figura 10.** Vista isométrico inferior del modelo CAD 3D del Horno ladrillero.



**Figura 11.** Modelo CAD 3D de las paredes (exteriores) y el domo o cúpula del horno ladrillero visto desde la parte superior.



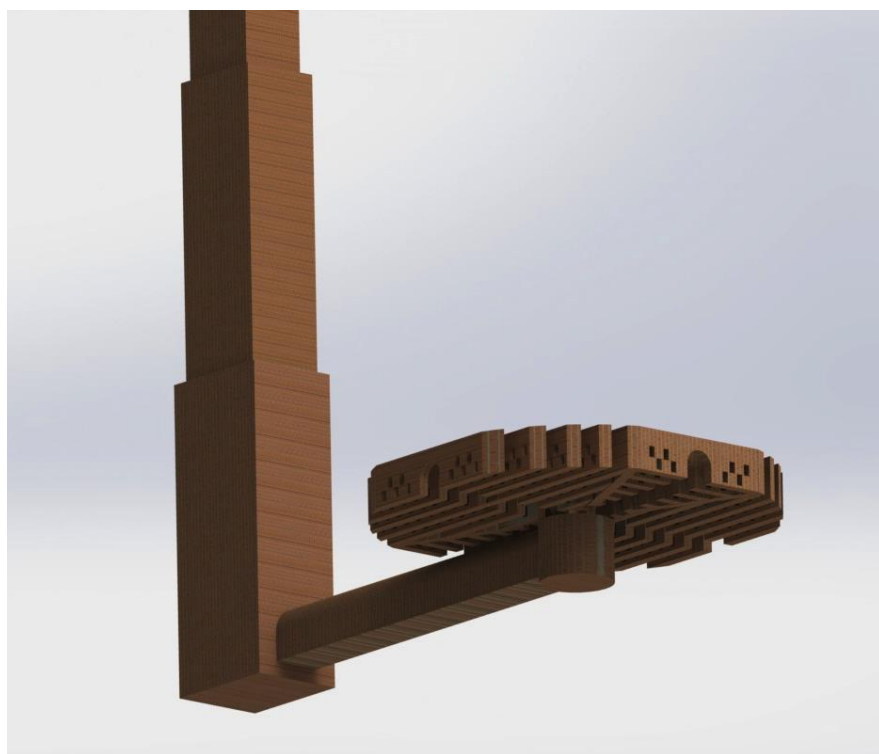


**Figura 12.** Modelo CAD 3D de las paredes (interiores), cavidades donde se ocurre la combustión y cámara interior en donde sucede la cocción de los ladrillos.

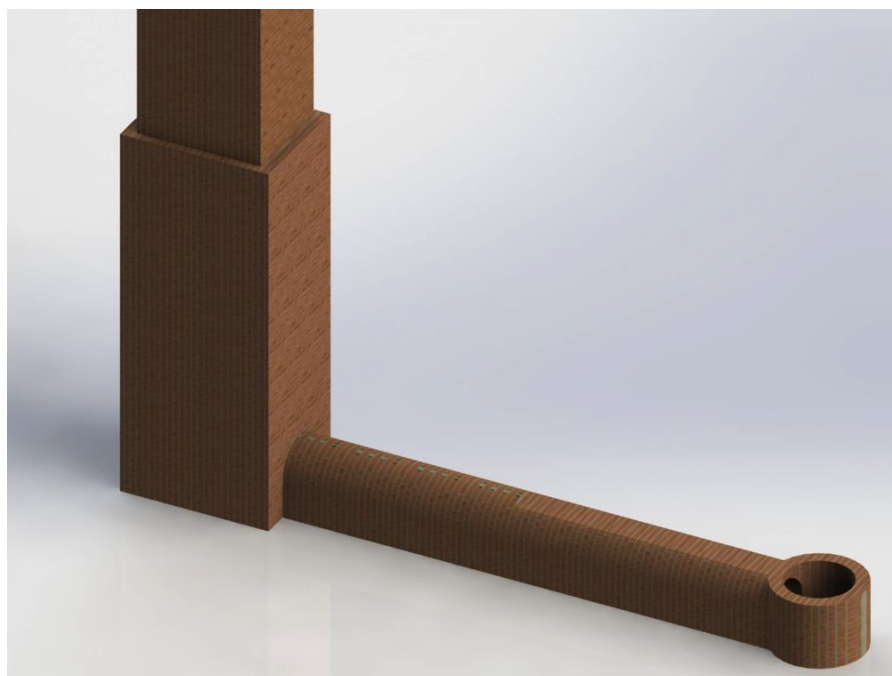


**Figura 13.** Distribución del piso en “espina de pescado” y chimenea.





**Figura 14.** Vista Inferior del piso en “espina de pescado” y chimenea.



**Figura 15.** Conducto para gases de escape y chimenea.

## **4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

Con el fin de obtener una solución numérica tan aproximada a la realidad como fuera posible sobre la eficiencia térmica del horno, fue necesario implementar un modelo que reprodujera los fenómenos termo-físicos que suceden durante la operación de este tipo de artefactos. Para ello se decidió utilizar el método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés), el cual es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales que describen un suceso en específico que se desee estudiar, que gracias a su alto nivel de confiabilidad (dependiendo del software procesador que se utilice) y su versatilidad para el trabajo sobre geometrías complicadas, es de los más utilizados en la industria ingenieril.

Esta fase del proyecto se conoce como la etapa del preproceso y es donde el dominio del problema debe discretizarse. Esto, haciendo uso de un conjunto de puntos y líneas que forman elementos en varias dimensiones que su vez forman una malla, la cual puede ser creada por infinidad de programas que hoy hay disponibles para este fin. Para este caso en particular, teniendo en cuenta la complejidad del modelo y la alta precisión demandada por el proyecto EELA, se decidió hacer uso de Altair Hypermesh como software para el mallado del horno, debido a que es uno de los programas más especializados en cuanto a despliegue de mallas computacionales para CFD se refiere.

### **4.1 MALLADO**

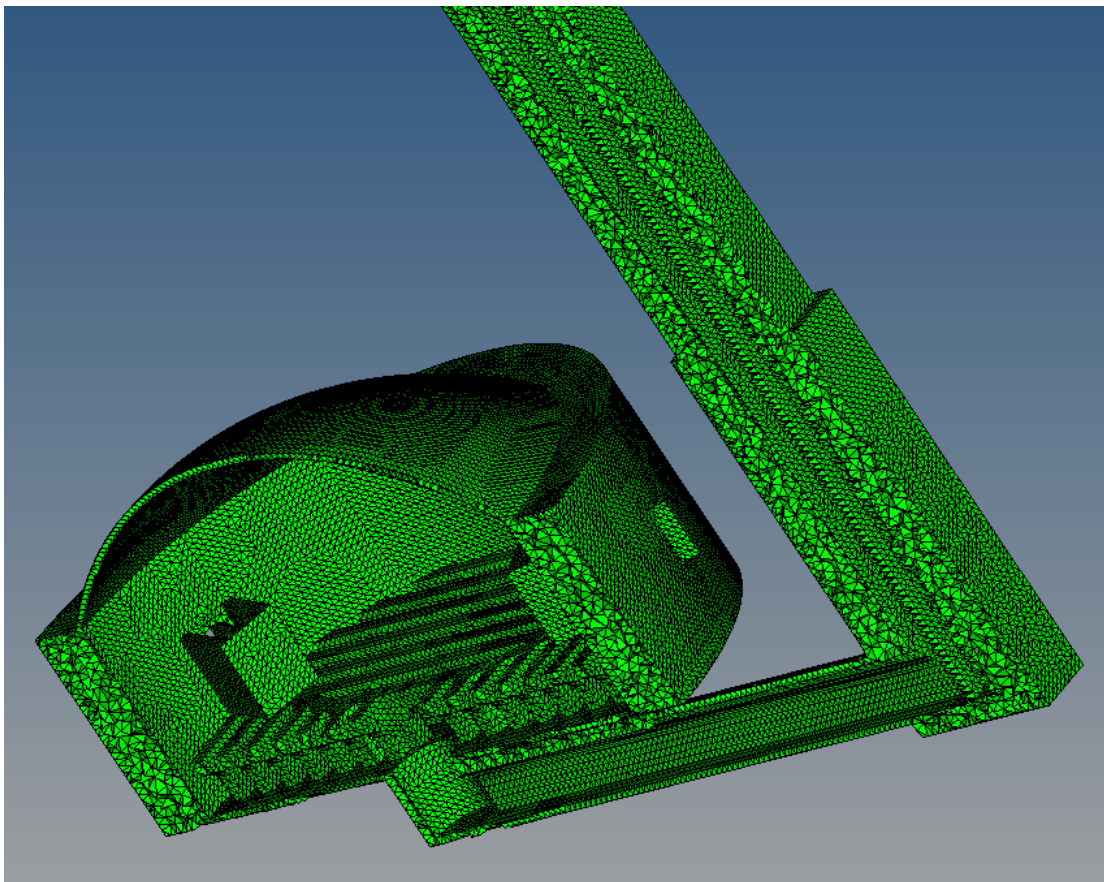
Aquí es donde se realiza el mallado de la geometría del horno modelada en el Capítulo 3. Para su despliegue se tomaron las siguientes consideraciones:

- Para evitar inconvenientes en la manipulación y realización del mallado, se busca reducir el costo computacional que la generación de la malla pudiera generar. Para ello se discretizó únicamente la mitad de la geometría con una capa de simetría que al ser exportada como archivo compatible al procesador (Fluent), este permitiera directamente en su interface duplicar el lado restante de la malla para la simulación. Esta situación es Visible en la Figura 16 y Figura 17.
- Con el Fin de reproducir tan exacta como fuera posible la geometría de horno y evitar que la disposición de los elementos que conforman la malla deformara los perfiles originales del mismo, se hizo uso de

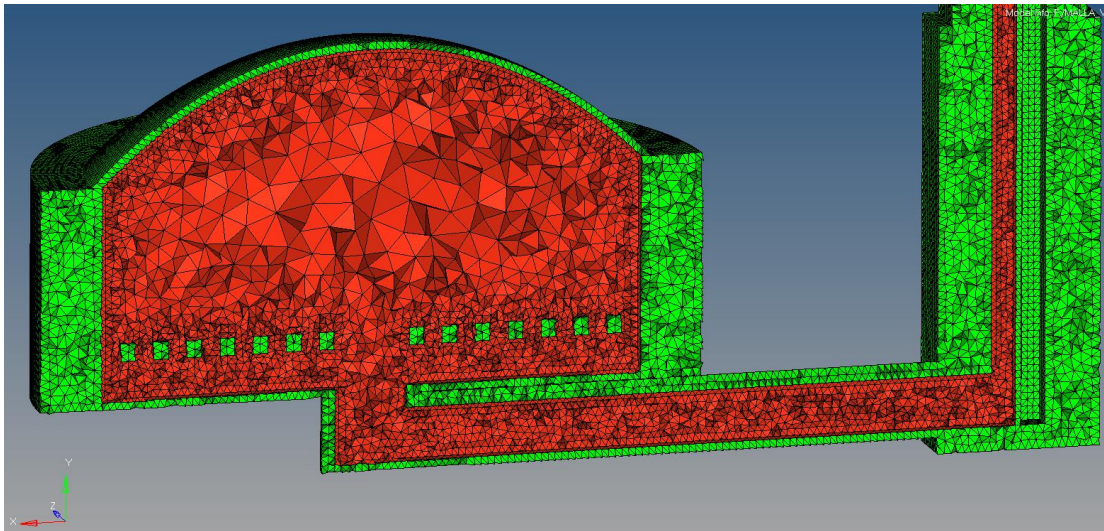
una malla del tipo no estructurada[10][11] con elementos únicamente triangulares en 2D para las superficies, cada uno con área aproximada de 0,5 milímetros cuadrados, esto debido a que su tamaño fluctuaba dependiendo de la ubicación ( $1\pm 0,5$  mm por arista) y tetraédricos en 3D para los espesores y fluidos circundantes al interior de Horno, cuyo tamaño varia con respecto a su lejanía o cercanía a las mallas 2D tal y como se observa en la Figura 17.

En total, se hicieron 23 mallas computacionales de diferentes tipos. De las cuales solo 6 de ellas cumplieron con las especificaciones expuestas anteriormente y fueron utilizadas cada una de ellas para un caso específico de estudio en el proyecto.

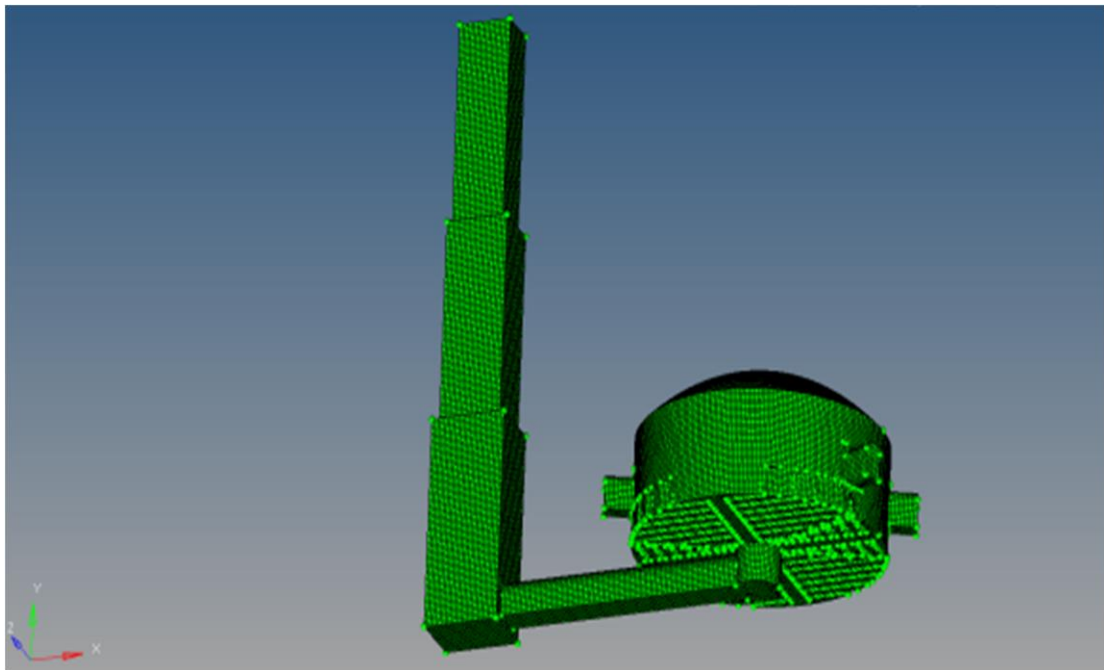
Como resultado final la malla base de la cual se desprenderían los casos de estudio fue obtenida con base al modelo CAD del horno y contuvo un número aproximado de 3.97 millones de elementos. Esta se muestra a continuación:



**Figura 16.** Mallado computacional del horno ladrillero en estudio.



**Figura 17.** Mallado computacional correspondiente al horno ladrillero (verde) y el fluido circundante al interior del mismo, aire (rojo).



**Figura 18.** Honro ladrillero mallado visto desde su parte posterior inferior.

Es de resaltar que la malla vista entre la Figura 16 y la Figura 18, sufrió varias modificaciones a lo largo de las simulaciones, esto como medida para llevar el modelo matemático que describe el proceso de cocción de los ladrillos a una rápida convergencia, sin contemplar tiempos excesivos de simulación o la total divergencia del mismo.

## 5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN UTILIZANDO FLUENT

Obtener un modelo para simulación CFD es bastante complejo pues características como el mallado, la geometría, los parámetros iniciales, el tiempo a simular o la duración de la misma, pueden exceder las capacidades computacionales o de tiempo con las que se cuenta para la realización de un estudio e inclusive como ya se ha nombrado anteriormente, generar errores o divergencias sobre el software procesador. Por ello para esta investigación fue necesario determinar parámetros específicos que permitieran alcanzar el objetivo final del proyecto, con una alta precisión y cercanos a realidad, sin caer en dichos contratiempos. Para lograr dicho propósito, se consideraron las simulaciones preliminarmente realizadas en el CIMA relacionadas con el estudio de hornos ladrilleros tipo bóveda, para así, determinar qué se había estudiado previamente y que conclusiones era posible sacar de ellas, para obtener un método de simulación que se acomodara la infraestructura de computo (Hardware y Software) disponible en el centro de investigación y que cumpliera también con los tiempos de entrega propuestos por la empresa CAIA Ingeniería.

### 5.1 ESTUDIOS PREVIOS

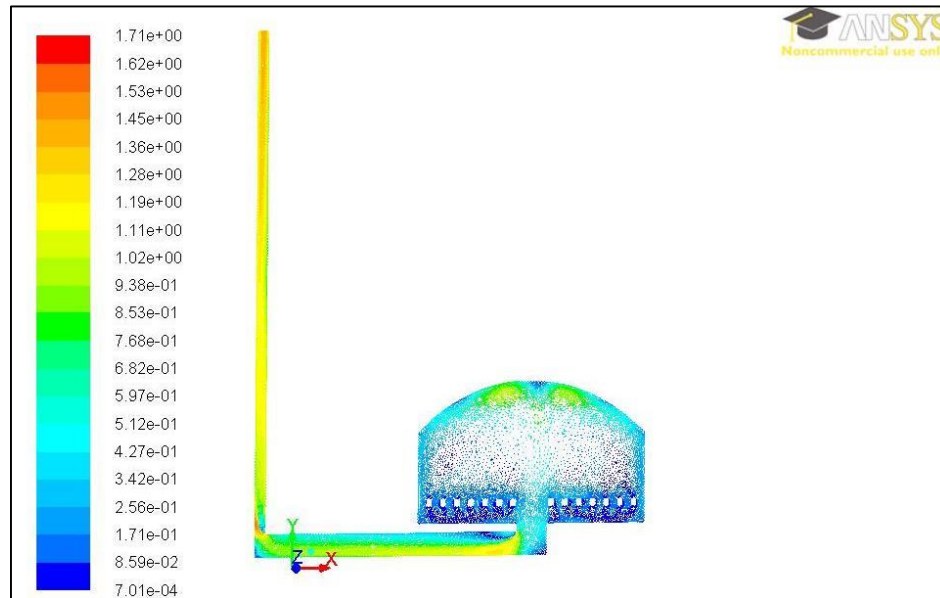
Los hornos ladrilleros tipo colmena eran una temática de estudio ya trabajada en el CIMA, en la cual se habían realizado varias simulaciones en Fluent. De estas, tres habían sido exitosas y contaban con información útil para el desarrollo de la metodología. A continuación se enuncia brevemente lo realizado en ellas.

**5.1.1 Modelo previo 1: Honro ladrillero funcionando vacío.** Fue el primero de los estudios y en él se buscó entender cómo se movía el aire al interior del horno y cuál era su comportamiento al interior de la cámara de cocción antes de emprender su camino hacia la chimenea. En este el horno como se puede observar en la Figura 19 no contenía ningún objeto sólido en su interior. La Figura 19 y la Figura 20 son algunos de las distribuciones de resultados obtenidas.

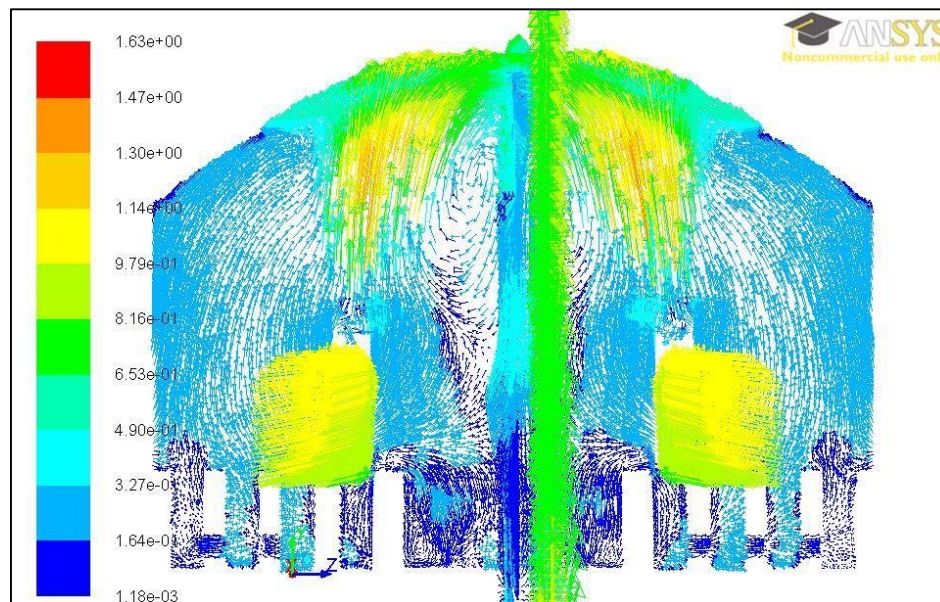
**5.1.2 Modelo previo 2: Horno ladrillero con esfera sólida en su interior.** El objetivo principal de este modelo fue simular los procesos de transferencia de masa y calor dentro del horno con el fin de determinar la relevancia de dichos fenómenos durante la simulación, teniendo como parámetro de evaluación que es a altas temperaturas cuando se presenta la mayor pérdida



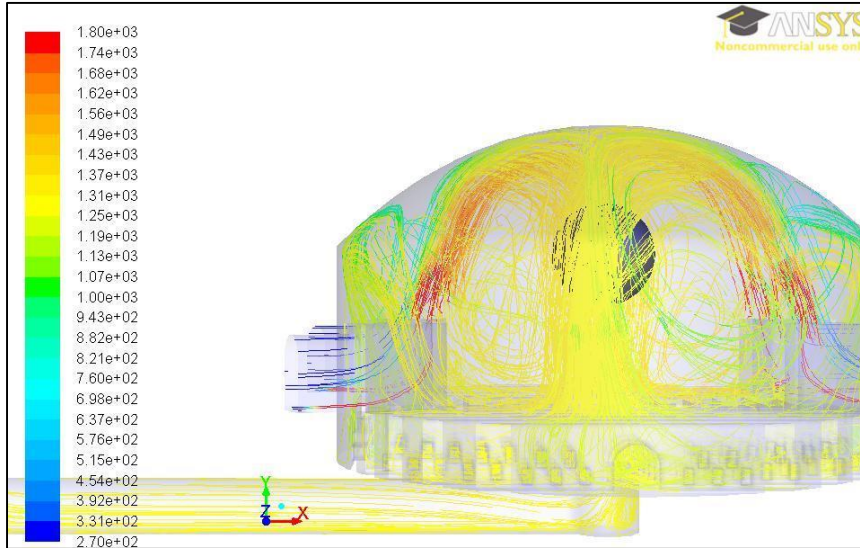
de energía térmica al ambiente y así comprobar si era necesario tenerlos en cuentas en los cálculos posteriores. La Figura 21 y Figura 22 muestran algunos de los contornos de resultados obtenidos.



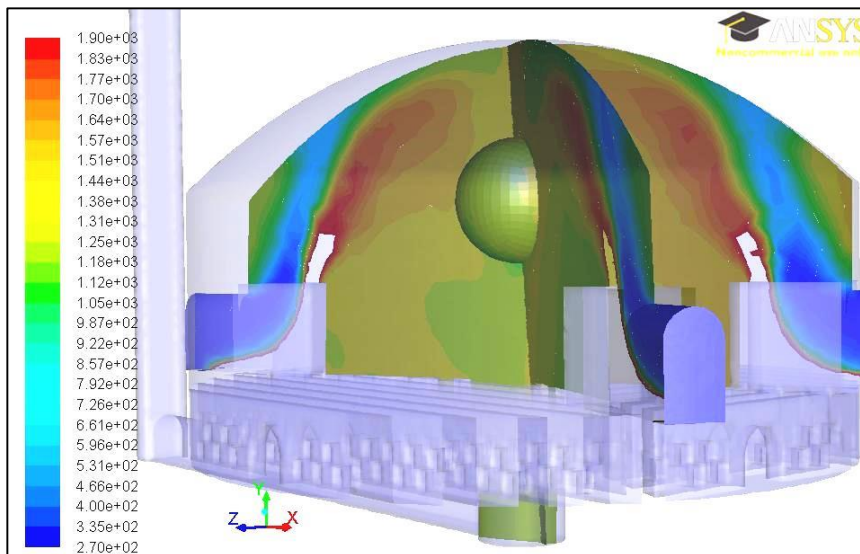
**Figura 19.** Vectores de velocidad coloreados por magnitud (m/s) para el modelo previo 1, vista con chimenea.



**Figura 20.** Vectores de velocidad coloreados por magnitud (m/s) para el modelo previo 1, vista solo cámara de cocción.



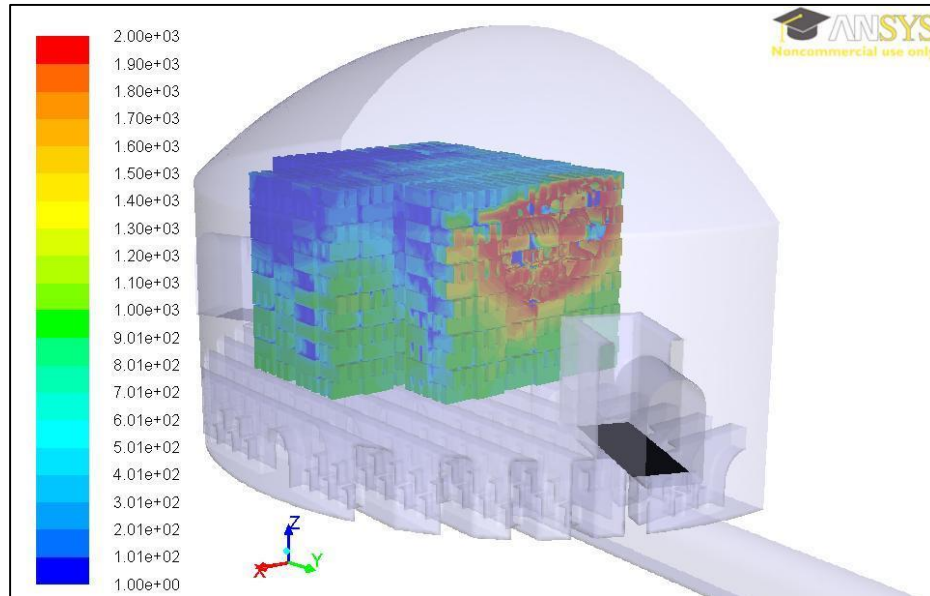
**Figura 21.** Líneas de recorrido del aire al interior de la cámara de cocción coloreadas por magnitud e temperatura (K) para el modelo previo 2.



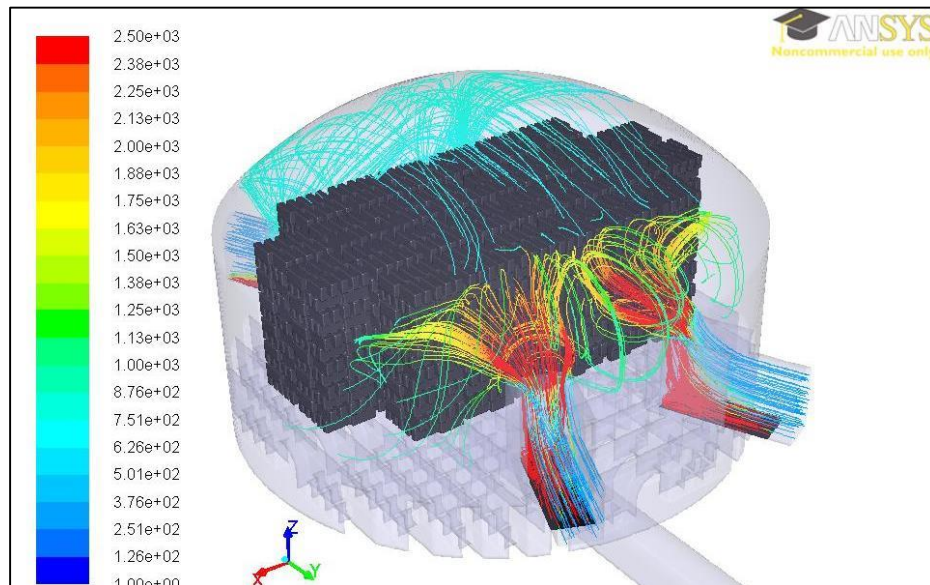
**Figura 22.** Contornos totales de temperatura (K) para el modelo previo 2.

**5.1.3 Modelo previo 3: Horno ladrillero con endague de ladrillos y carga parcial.** Este fue el primer acercamiento a modelar el funcionamiento real del horno. En este, se dispuso un endague de ladrilleros al interior del mismo. Se caracterizó por la dificultad de mallado de cada uno de los ladrillos como solidos individuales, qué dio como resultado la imposibilidad de llenar totalmente la cavidad donde se dispone la arcilla cortada en cuboides para ser horneada y como consecuencia final la simulación a carga parcial.

Su objetivo principal fue determinar cómo influía la presencia y organización de los ladrillos al interior del horno en la convergencia del modelo. La Figura 23 y la Figura 24 muestran algunos de los resultados finales de esta modelación.



**Figura 23.** Contorno de temperaturas del endague de ladrillos al interior del horno para el modelo previo 3.



**Figura 24.** Líneas de recorrido del fluido coloreadas por magnitud de temperatura (K) para el modelo previo 3.



## 5.2. METODOLOGIA FINAL DE SIMULACION

Haciendo uso de la información recolectada a partir de la modelaciones previas enunciadas anteriormente fue posible llegar a las siguientes conclusiones:

- Excepto en la etapa de baja temperatura, el proceso de cocción no involucra transferencia de masa, únicamente transferencia de calor. Por lo tanto no es necesario modelar el proceso de secado o proceso de evaporación del agua presente la carga del horno, para caracterizar el desempeño del mismo.
- No es posible modelarlo como un fenómeno de estado estable pues conforme al transcurso del tiempo todo el horno llegaría a una temperatura uniforme donde la carga de ladrillos en cocción igualarían la temperatura del aire que a su vez ya ha alcanzado la temperatura desprendida por la combustión.
- La simulación de los espacios entre los ladrillos (modelo previo 3) conducen a errores de convergencia y tiempos excesivos de computo, es decir, dichas simulaciones llegaron a tardar hasta más de una semana sin pausa en el software procesador (Fluent).
- El poner en contacto la malla del endague de ladrillos sobre la que delimita el piso en espina de pescado del horno lleva el modelo a divergencia total.
- Lograr congruencia entre la malla de los elementos 2D de un ladrillo con los de otro cuando estos están en contacto en el endague, haciendo de una malla estructurada, resulto ser de alta dificultad y por ende de tiempo excesivo de construcción.

En vista de dichos inconvenientes, fue necesario determinar varias estrategias que asegurarían una simulación de los casos finales conforme a los objetivos de esta investigación, y estas fueron:

- Se simulara un total de 3600 segundos de funcionamiento del horno en la etapa de alta temperatura, es decir, con temperatura inicial de 400 Kelvin, considerando únicamente el proceso de transferencia de calor del aire hacia la carga en cocción con un horno en completa hermeticidad, es decir, paredes del artefacto adiabáticas.

- Se modelara el sistema como un proceso de estado transitorio en Fluent, con un total de 30 intervalos de tiempo (*time steps*) cada uno con tamaño de 120 segundos y un máximo de 600 iteraciones por intervalo o con disminución de residuales iguales o inferiores 4 a órdenes de magnitud ( $e-4$ ), lo que suceda primero [12], asegurando la convergencia y estabilidad por lapso de tiempo registrado, y limitando la duración de la simulación a tres días de computo aproximadamente.
- Se colocara la malla correspondiente a la masa de los ladrillos a una distancia de un centímetro del piso sin importar la distribución del mismo para evitar la divergencia por contacto entre mallas.
- Se modelara el endague de material como una masa porosa de igual tamaño que reproduzca el fenómeno del paso del aire a través de los ladrillos utilizando un valor porosidad que de dicha equivalencia, y considerando todo lo que esto implica; caída de presión a través del endague y absorción de energía. El procedimiento para hacer dicha aproximación se especifica en la sección 5.2.1.

**5.2.1 Simulación del grupo de ladrillos y su endague mediante una masa porosa.** Como medida definitiva para reducir el tiempo de simulación y las dificultades en el mallado, se buscó reemplazar el arreglo intercalado de ladrillos-aire por una masa porosa que emule tan exacto como sea posible, dicha configuración. Para ello se diseñaron un par de cubos huecos (Figura 25) cada uno de ellos con una entrada lateral y una salida por la parte inferior, que contuvieron en su interior, uno el endague de ladrillos (Figura 26, derecha) y el otro la masa porosa equivalente (Figura 26, izquierda) para posteriormente ser llevados a Fluent y evaluar qué tipo de consideraciones había que tener dentro de dicho software para que los resultados obtenidos fueran los mismos.

Para que el sólido poroso lograra comportarse como el endague de ladrillos, fue necesario conseguir similitud en tres propiedades que se consideraron como las más relevantes, estas fueron:

1. Similitud geométrica: se consiguió por construcción, la malla correspondiente a los ladrillos más aire se reemplazó por una única malla.
2. Similitud Térmica: se obtuvo adjudicándole a la masa porosa las mismas propiedades físicas de los ladrillos[13]. Estas fueron:

- Densidad

$$\rho = 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Conductividad térmica

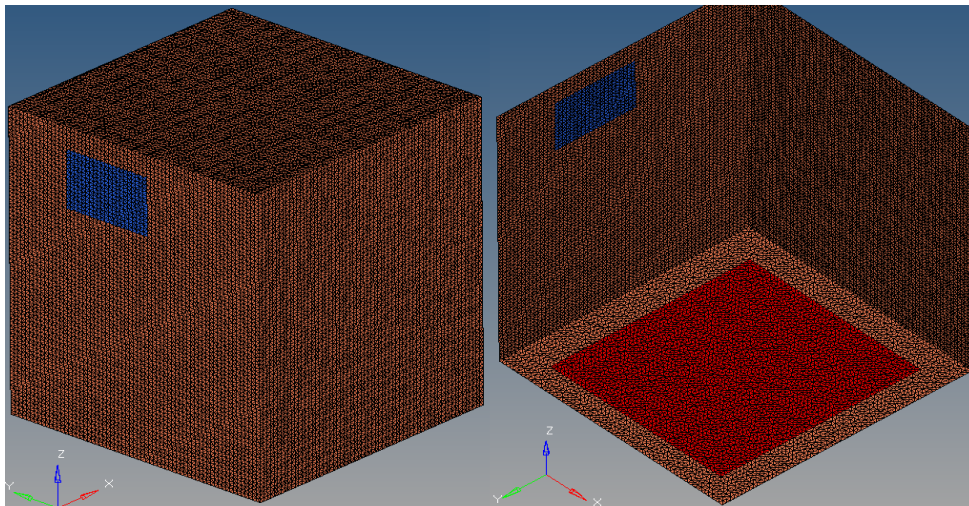
$$\lambda = 0,87 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

- Difusividad térmica

$$\alpha = 0,529 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

- Calor específico

$$C_p = 840 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$$



**Figura 25.** Mallado de las cubos para evaluar la simplificación de modelo de ladrillos a una masa porosa. Entrada (azul) y Salida (rojo)

3. Similitud relativa a la porosidad: corresponde a la fracción de huecos de la masa que emulara el arreglo. Esta, es una medida de los espacios vacíos en el material de fabricación de los ladrillos y relaciona la porción del volumen correspondiente a dichos orificios sobre el volumen total, sólido más aire. Véase la Ecuación 1 [14].

$$P = \frac{V_a}{V_a + V_l} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,

$V_a$ : Volumen vacío (volumen de aire entre los ladrillos).

$V_l$ : Volumen ocupado por los ladrillos presentes.

La malla tanto de los ladrillos como la del aire circundante se construyó del tipo estructurada, es decir, conformada únicamente por cuadrados y cubos regulares para sus elementos 2D y 3D respectivamente con el fin de lograr contabilizar la totalidad de ellos y facilitar el cálculo de la porosidad equivalente. Por ello el volumen del aire y el volumen de los ladrillos se definen así:

$$V_a = EA * V_e \quad (\text{Ec. 2})$$

$$V_l = EL * V_e \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde,

$EA$ : Número total de elementos que forman el aire.

$EL$ : Número total de elementos que forman los ladrillos.

$V_e$ : Volumen de cada elemento.

Gracias a la uniformidad de los elementos de la malla inicial aire-ladrillos, el volumen de todos los elementos es el mismo y por tanto factorizando se obtiene que:

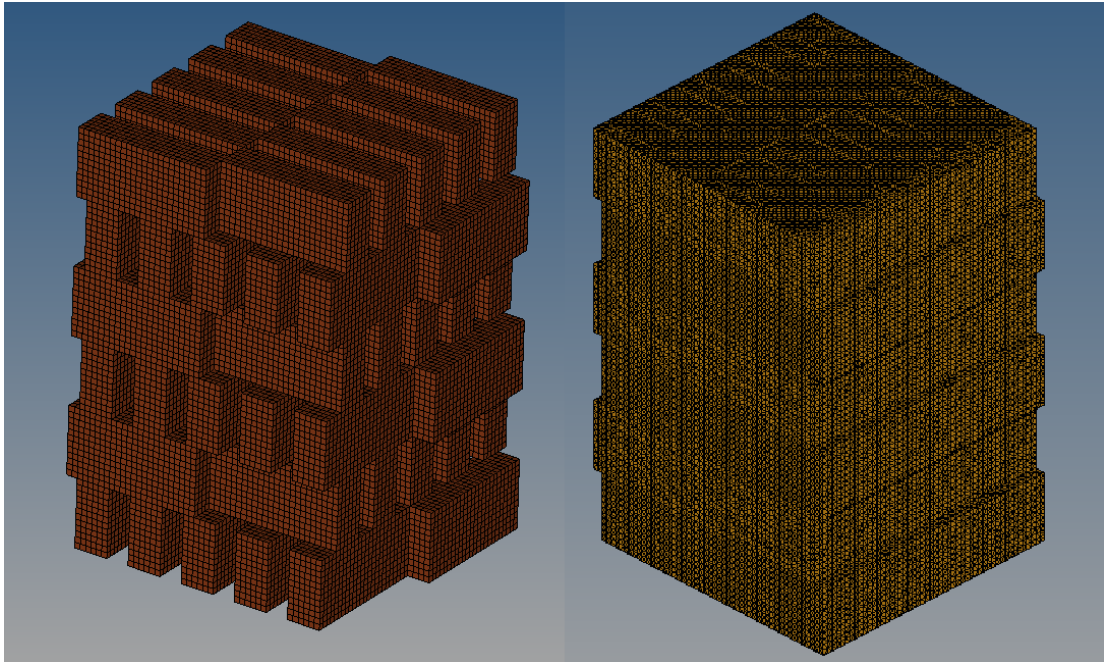
$$= \frac{EA}{EA + EL} \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo,

$EA$ : 76320 elem.

$EL$ : 103680 elem.

$$\rightarrow P = 0,424 = 42.4 \% \quad (\text{Ec. 5})$$



**Figura 26.** Malla endague de ladrillos (izquierda) y malla masa porosa (derecha).

Una vez listos los parámetros se introdujo el modelo a Fluent y se puso a correr hasta llegar a convergencia. Finalizada la simulación, los resultados obtenidos corroboraron la precisión de la equivalencia, pues la caída de presión entre la entrada y salida a pesar de no ser la misma en los dos casos y puede constituir un sacrificio de precisión del modelo homólogo en prueba, si fue bastante similar como se puede observar en la Tabla 2 resaltado en rojo. Dicha perdida de energía constituye un frenado por fricción al interior del horno era de los parámetros más relevantes a emular y por concepto ingenieril se considera aceptable la diferencia para los fines investigativos de este proyecto.

CASE 1		CASE 2	
Mass Flow Rate (kg/s)		Mass Flow Rate (kg/s)	
Inlet 20.58		Inlet 20.58	
Outlet -20.58		Outlet -20.58	
Total Pressure (Pascal)(m2)		Total Pressure (Pascal)(m2)	
Inlet 83.38		Inlet 53.36	
Outlet 9.77		Outlet 2.19	
<b><math>\Delta P</math> 73.61</b>		<b><math>\Delta P</math> 51.17</b>	
Velocity Magnitude (m/s) (m2)		Velocity Magnitude (m/s) (m2)	
Inlet 16.80		Inlet 16.80	
Outlet 35.74		Outlet 29.42	

**Tabla 2.** Resultados arrojados por Fluent posteriores a la simulación.  
Caída de presión resaltada en rojo.

Es de resaltar que la velocidad a la entrada (Velocity Magnitude –Inlet) y el flujo másico ingresado (Mass Flow Rate-Inlet) visibles en la Tabla 2 son parámetros conocidos y predefinidos al inicio de la simulación.

Ya determinados todas las condiciones necesarias para un modelado conforme a lo que se buscaba se proceden a realizar las simulaciones finales de las cuales se calculará el rendimiento térmico de un horno ladrillero tipo bóveda.

## **6. SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN HORNO LADRILLERO TIPO BÓVEDA UTILIZANDO FLUENT (CFD)**

Este capítulo contiene los resultados de la asesoría en el proceso de reconversión tecnológica en las plantas ladrilleras ubicadas en el municipio de Nemocón Cundinamarca, beneficiarias del proyecto EELA, prestada por parte de la empresa CAIA ingeniería y el CIMA a la filial de la cámara de comercio de Bogotá, CAEM; con el objetivo de implementar modelos integrales de producción limpia en las ladrilleras artesanales como una propuesta para el acceso a los mercados de carbono apoyados en los datos que se obtengan a partir de la investigación motivo de este documento.

Estas memorias de resultados incluyen también la parametrización utilizada para la realización las simulaciones, la base teórica para llegar a ellas y los aspectos metodológicos generales de las mismas.

Como primera medida se ha realizado una síntesis de los fundamentos teóricos que gobiernan el funcionamiento del software procesador Fluent; y así de forma subsiguiente llevar a cabo la modelación por alimentación de aire y combustible típicos de los hornos tradicionales como Caso Base de estudio, para a partir de allí modelar 3 modificaciones y determinar las mejores condiciones de cocción y uso de combustible, e identificar los elementos y variables que generan una mayor eficiencia térmica.

### **6.1 BASE TEÓRICA: MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

Es importante tener claridad sobre el funcionamiento del procesador antes de utilizarlo, para ello con literatura documentación existente a fin con el temática [12][15]

**6.1.1 Generalidades.** El paquete de software a utilizar en este proyecto, ANSYS, utiliza un enfoque multidisciplinario a la simulación en el que los modelos de flujo de fluidos se integran perfectamente con otros tipos de tecnologías de simulación física. Los resultados de la simulación pueden ser utilizados como parte de un proceso impulsado por el desarrollo de un producto, para ilustrar cómo este o un proceso específico funciona, para solucionar problemas o para optimizar el rendimiento y el diseño de nuevos productos. La tecnología de CFD proporciona acceso tanto a FLUENT como a CFX. Los cuales son los principales productos de uso general que ofrece la simulación de fluidos, siendo el primero de estos el software predeterminado para el desarrollo de este proyecto. FLUENT, es un software que contiene

amplias capacidades de modelado físico necesario para labrar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el paso de aire sobre el ala de un avión; a la combustión en un horno, de columnas de burbujas; a las plataformas petroleras, desde el flujo sanguíneo; a los semiconductores, entre otras.

**6.1.2 Fluidodinámica computacional.** CFD (Computational Fluid Dynamics) es una disciplina de la mecánica de fluidos donde se realiza la simulación numérica del comportamiento de sistemas de flujo fluido, transferencia de calor, reacción química y otros fenómenos físicos relacionados. El CFD resuelve las ecuaciones del flujo fluido en la región o dominio de interés, con condiciones específicas en los contornos del dominio.

En las Bases de la Fluidodinámica Computacional se encuentran las ecuaciones que describen los procesos de intercambio de cantidad de movimiento, calor y masa, las cuales se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes. Estas, Son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que no tiene solución analítica general, pero que pueden ser discretizadas y resueltas numéricamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (\text{Ec.6})$$

Donde  $\phi$  es la variable transportada,  $t$  es el tiempo,  $A$  es el área superficial,  $V$  el volumen,  $\Gamma$  es la difusividad de la variable, y  $S_\phi$  es la fuente de  $\phi$ .

El primer término en la ecuación (1) representa el transporte transitorio de  $\phi$ ; el segundo describe el transporte por convección; el tercero, el transporte de  $\phi$  por difusión y el cuarto, reproduce la fuente o sumidero de  $\phi$ .

Otras ecuaciones para la integración de otros fenómenos físicos, como la combustión por ejemplo, pueden resolverse en conjunción con las ecuaciones de Navier-Stokes. En general estos fenómenos se describen con modelos o series de ecuaciones, que describen el fenómeno físico. Un ejemplo típico son los modelos de turbulencia.

El método más común de resolución de las ecuaciones es el de volúmenes finitos. La región o dominio de interés se divide en pequeñas subregiones llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones son discretizadas y resueltas iterativamente para cada volumen de control. De esta forma se obtienen valores para cada una de las variables en el dominio.

**6.1.3 Método de los volúmenes finitos.** El primer paso en la aplicación de la Fluidodinámica computacional consiste en la discretización espacial del



dominio para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes.

El método de los volúmenes finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares o cuadrados en 2-D o tetraédricos, hexas, prismas y otras en 3-D, generando una malla. Dependiendo del tipo de elemento, de la capacidad de computación disponible y de la precisión que se quiera en la resolución del flujo, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicado por el número de variables es el número de grados de libertad del problema.

**6.1.4 Modelos empleados para la resolución del problema.** Estos describen las metodologías teóricas a implementar para la resolución del problema. Los modelos que se utilizaran para la resolución de la problemática inherente a la temática del proyecto, son los siguientes: Modelo de Turbulencia K-Épsilon y Modelo de Transferencia de Calor por Conducción y convección.

**6.1.4.1 Modelo de turbulencia K-Épsilon.** Es uno de los modelos de turbulencia más implantados a nivel industrial y cuenta con dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo.

La primera expresión de este modelo es la energía cinética turbulenta (K, Ecuación 2), dicha variable determina la intensidad turbulenta, mientras que la segunda representa la disipación turbulenta (Épsilon, Ecuación 3), y son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Ec.7})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde  $G_k$  es generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios;  $G_b$ , es la generación de energía cinética debido a la flotabilidad;  $Y_M$ , es la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$  y  $\sigma_t$ , son las constantes determinadas experimentalmente;  $\mu_t$ , es a la viscosidad turbulenta y;  $\sigma_k$  y  $\sigma_\epsilon$  son los valores correspondientes al número de Prandtl en función de  $k$  y  $\epsilon$  respectivamente.

**6.1.4.2 Transferencia de Calor en FLUENT.** ANSYS permite incluir

transferencia de calor dentro del fluido y/o solidos presentes en el modelo. Cuando es necesario incluir la transferencia de calor para la simulación, es preciso activar los modelos físicos pertinentes, como loes proporcionar las condiciones de contorno térmicas y propiedades de los materiales que gobiernen las características más relevantes de este fenómeno en los elementos y/o variar las temperaturas en los diferentes estados como parte de las configuraciones previas a la simulación.

ANSYS FLUENT resuelve la ecuación de energía con la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde  $k_{eff}$  es la conductividad efectiva ( $k + k_t$ , donde  $k_t$  es la conductividad térmica turbulenta, definida de acuerdo con el modelo de turbulencia utilizado), y  $\vec{J}_j$  es el flujo de difusión de especies  $j$ . Los primeros tres términos de la ecuación (4) representan la transferencia de energía debido a la conducción, a la difusión de especies, y la disipación viscosa, respectivamente.  $S_h$  Incluye el calor de las reacciones químicas, y cualquier otra fuente de calor volumétrica que se haya definido.

En la ecuación (4),

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde la entalpia sensible  $h$  está definida por gases ideales como,

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (\text{Ec. 11})$$

Y por flujos incompresibles como,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (\text{Ec. 12})$$

En la ecuaciones (5) y (6),  $Y_j$  es la fracción de masa de las especies  $j$  y,

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde la Temperatura de referencia es 298,5 K generalmente. Como dato importante cabe resaltar también que el cálculo de la entalpia sensible usa diferentes temperaturas de referencia cuando el “solver” de FLUENT está basado en la densidad con respecto a cuándo está basado en la presión ( $T_{ref} = 298.15$ ).

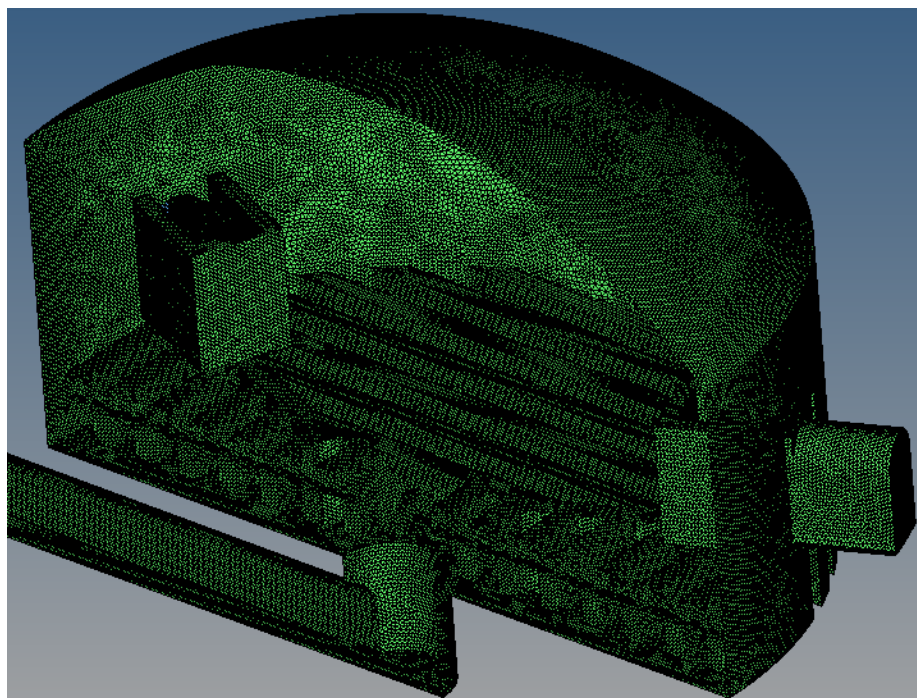
## 6.2 SIMULACIÓN CASO BASE: QUEMA DE CARBÓN A ATMOSFERA ABIERTA CON DISTRIBUCIÓN DE PISO EN “ESPINA DE PESCADO”.

Esta etapa del proyecto se conoce el procesamiento y corresponde a la simulación de la problemática haciendo uso del software CFD.

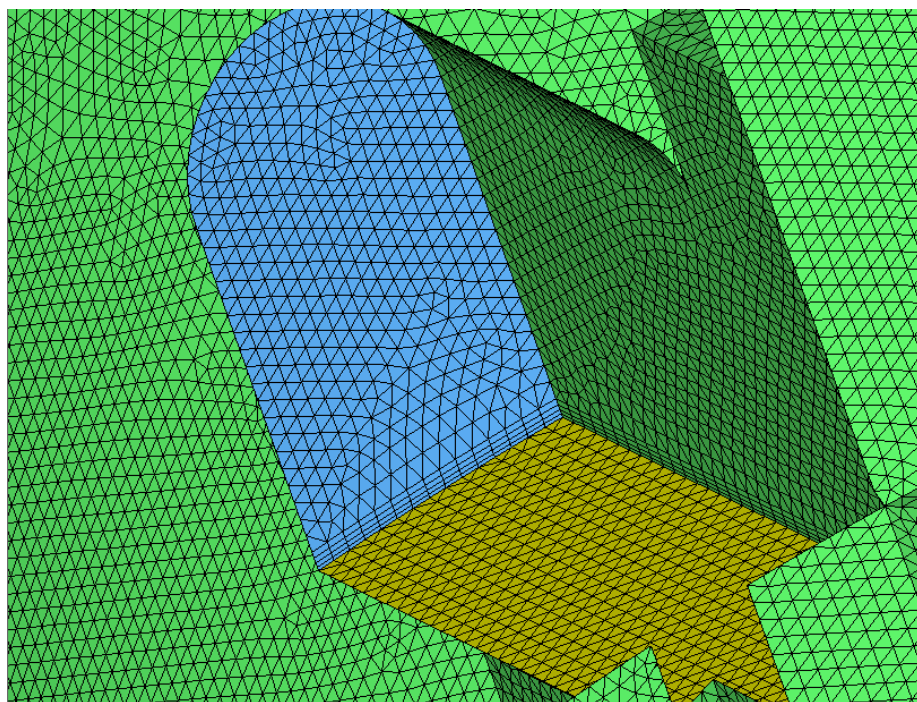
El primer escenario modelado al que llamaremos Caso Base, corresponde a la geometría de la base simétrica con salida de los gases de escape por el centro del piso, a este tipo de arreglo base se lo conoce como piso en espina de pescado. Este modelo se caracteriza por tener la cámara de combustión (Figura 4) abierta al aire atmosférico (**¡Error! No se encuentra el origen de a referencia.**) y el aire exterior que es succionado por delta de presiones hacia el interior horno arrastra el calor desprendido por la combustión hasta el interior del domo del artefacto.

**6.2.1 Mallado.** Como ya se nombró anteriormente que la malla inicial desplegada en el Capítulo 4 no era la definitiva, pues dependiendo de la simulación esta iba a ser modificada a conveniencia para obtener mejores resultados en un menor tiempo computo, por ello la malla utilizada para el Caso Base se muestra de la figura Figura 27 a la figura Figura 29 y cuenta con las siguientes características especiales:

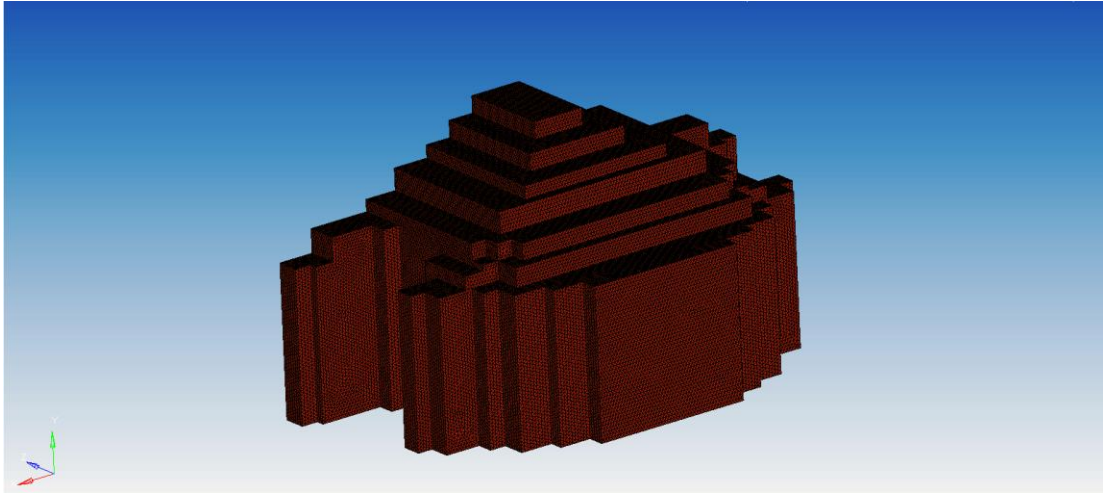
1. El uso de *Boundary Layer*. Esta es una herramienta de Hypermesh que permite realizar un mallado híbrido [10] entre la malla 2D de lo que será la superficie que emite calor (zona acontece la combustión) y el fluido circundante. Esta metodología le da exactitud al modelo al contemplar una malla estructurada en el sector donde inmediatamente se está desprendiendo calor. El *Boundary layer* se puede ver en la Figura 28, en la parte inferior de entrada como una malla compuesta por cuadros simétricos.
2. El mallado de espesores de paredes como ya se mencionó en el Capítulo 5, se descartó al igual que los procesos de transferencia de masa y secado al interior del horno. Es de resaltar que esta consideración fue adoptada para la totalidad de las simulaciones donde se le dará prioridad al fenómeno de transferencia de calor sucede al interior de la capa que delimitan las paredes del horno (Figura 27).
3. El endague de ladrillos se modelo como una masa porosa con las especificaciones detalladas en el Capítulo 5 y un total de 95 metros cúbicos de ladrillo, esta es la carga máxima para este horno en partículas (Figura 29). Este mismo volumen de ladrillos es que se dispone a analizar en el resto de los casos de estudio.



**Figura 27.** Mallado de la capa limite contenedora de los ladrillos y el fluido circundante que actúa como pared adiabática en Fluent

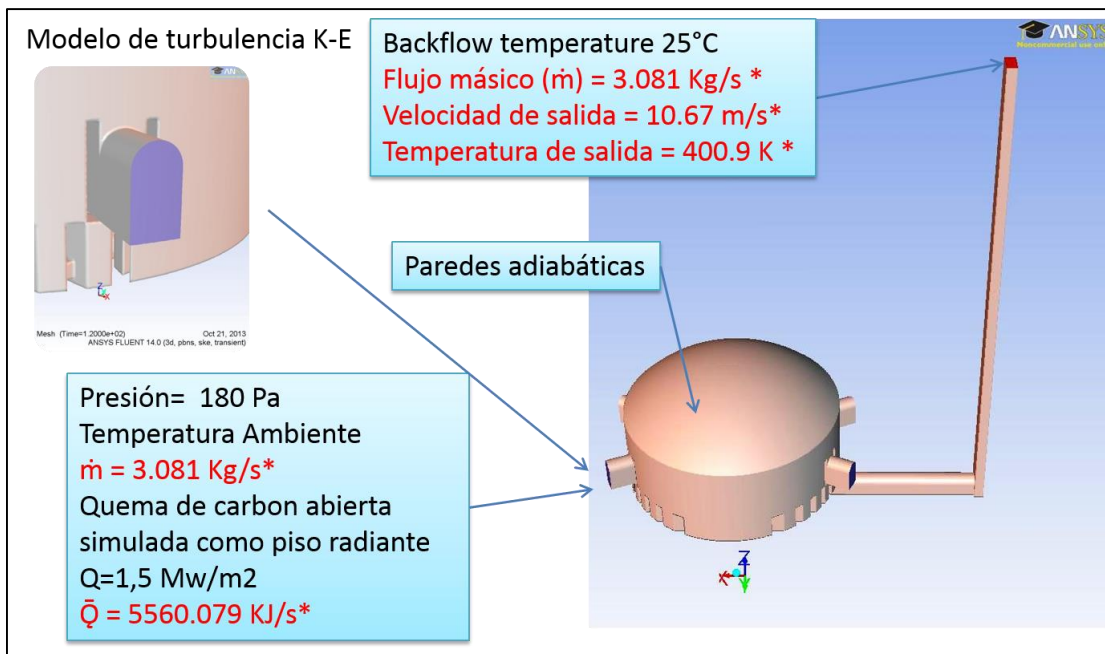


**Figura 28.** Zoom a la entrada de aire al Horno (azul), pared generadora de calor (amarillo) y capa limite (verde).



**Figura 29.** Malla de la masa porosa utilizada en todas las simulaciones.

**6.2.2 Condiciones de simulación.** La Figura 30 detalla las condiciones de operación utilizadas para la simulación del Caso Base en Fluent.

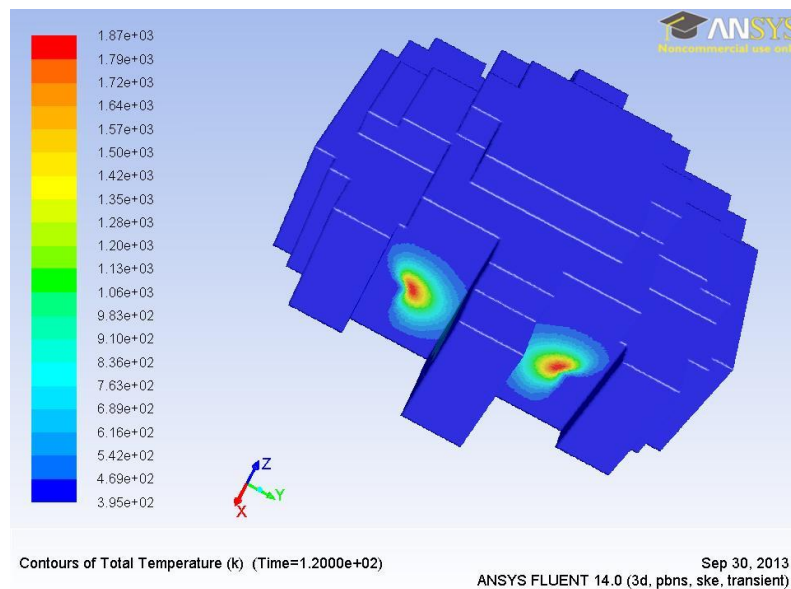


**Figura 30.** Condiciones de la simulación Caso Base. En rojo la información obtenida después de la simulación.

La figura anterior muestra los parámetros definidos por el usuario para la simulación, estos son: la presión de la malla en la entrada del horno que se estableció como 180 Pascales, para que el aire fuera succionado hacia el interior del horno; la temperatura con la se encuentran los gases producto de la combustión cuando salen del horno, igual a la temperatura atmosférica 25°C; el modelo de turbulencia a considerar, en este caso K-Épsilon; la temperatura inicial de la masa porosa de ladrillos (400 K) con sus respectivas propiedades físicas y termodinámicas tal y como se puntualizó en el Capítulo 5; y la cantidad de energía en forma de calor desprendida por unidad de área, la cual se parametrizó a 1,5 MW/m<sup>2</sup>, esto último con base en lo expuesto en las referencia bibliográfica [16] donde se indica que es necesario contar con 1.073 MJ para procesar un kilogramo de ladrillo.

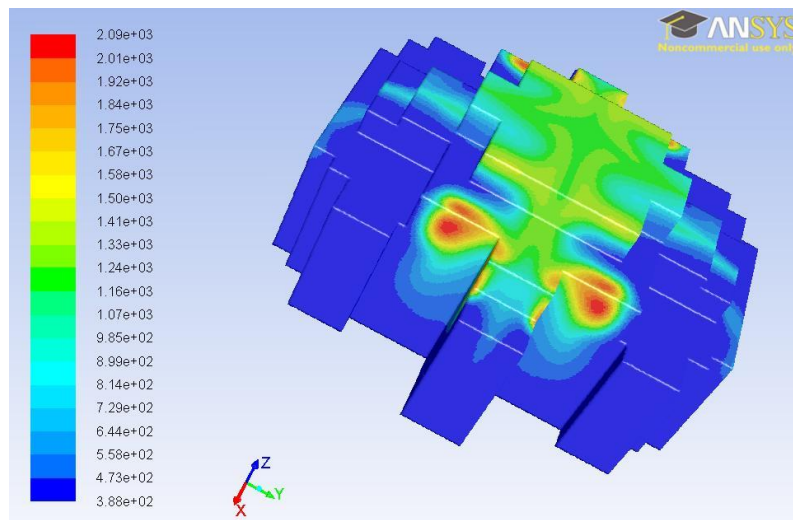
Los Parámetros restantes Fluent los define por defecto al no ser configurados por el usuario, los cuales son: la presión con la que se encontrará el aire al salir del horno y la presión a la que se encuentra dicho fluido antes de entrar, que la toma como presión atmosférica en los dos casos; la temperatura a la que vendrá entrando el aire, la cual la asume como temperatura ambiente igual a 300 K; y por último el aislamiento de las paredes del horno que al no predefinirles unas características termodinámicas y físicas, el software las trata como elementos adiabáticos.

**6.2.3 Posprocesamiento** Para facilitar el análisis de los resultados se decide visualizar los contornos d temperatura únicamente a los 120, 1800 y 3600 segundos de operación del horno como se muestra a continuación.



**Figura 31.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 120 segundos de operación del horno.

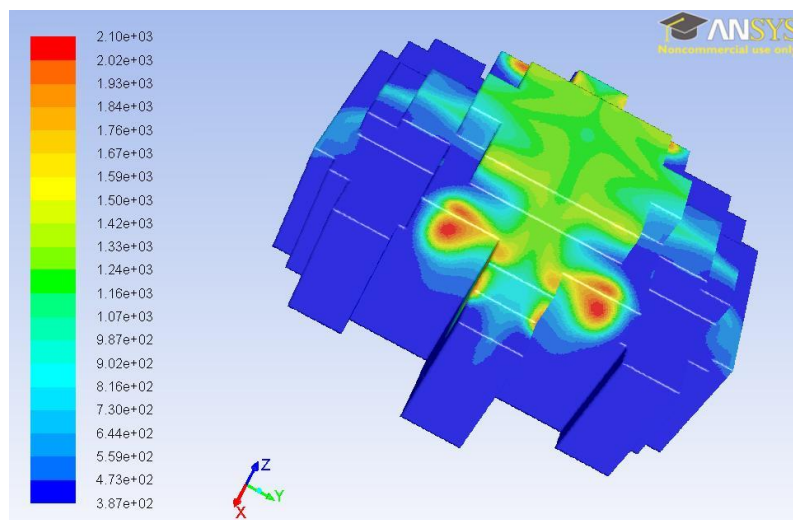




Contours of Total Temperature (k) (Time=1.8000e+03)

Sep 30, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske, transient)

**Figura 32.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 1800 segundos de operación del horno.



Contours of Total Temperature (k) (Time=3.6000e+03)

Sep 30, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske, transient)

**Figura 33.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso Base a 3600 segundos de operación del horno.

Una vez visualizado el resultado físico del calentamiento del bloque poroso, se procede a evaluar la eficiencia térmica instantánea para este primer escenario de simulación. Dicho rendimiento fue calculado haciendo uso de la Ecuación 14, la cual fue advertida por el Doctor José Ignacio Huertas Cardozo, líder de la ejecución de este proyecto en el CIMA, a base de

aprendizajes previos a fines con el tema.

$$\eta_t = \frac{m_l * C_l * (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)}{\dot{Q}_{in} * (\Delta t)} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde,

$\eta_t$ : Eficiencia Térmica del Horno

$m_l$ : Masa total de ladrillos dentro del horno [kg]

$C_l$ : Calor específico de los ladrillos [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ]

$\bar{T}_2$ : Temperatura promedio del bloque poroso en el tiempo  $t_2$  [K]

$\bar{T}_1$ : Temperatura promedio del bloque poroso en el tiempo  $t_1$  [K]

$\dot{Q}_{in}$ : Energía total proporcionada por el combustible [kW]

$(\Delta t)$ : Diferencia entre los tiempos en análisis,  $t_2$  y  $t_1$  [s]

La Tabla 3 muestra los resultados relativos a la evolución de la eficiencia térmica (Tabla 3.C), la temperatura de gases de salida (Tabla 3.a), la temperatura interna promedio (Tabla 3.B), el porcentaje de área que se calienta al paso del tiempo (Tabla 3.E) y su respectiva dispersión de datos (Tabla 3.D); todo esto durante una hora de calentamiento para el Caso Base (Estos fueron calculados haciendo uso de la Macro desarrollada en Microsoft Excel con Nombre “1-Caso Base” observable en el recurso digital Carpeta Macros). Allí se observa que a pesar de que la temperatura de los gases efluentes aumenta de manera exponencial al final de dicha hora, la eficiencia térmica se mantiene constante a valores cercanos a 60% y el aumento de la temperatura promedio del bloque poroso es lineal con el respecto al paso del tiempo.

**6.2.4 Análisis de resultados.** De los resultados obtenidos para este primer escenario de Simulación es pertinente afirmar:

- Las principales pérdidas de energía se deben a las altas temperaturas de salida de los gases de la chimenea, es decir que la mayor cantidad de energía suministrada al horno se pierde en forma de gases efluentes calientes (Tabla 3.A).
- El enfriamiento de la carga después del proceso de cocción equivale a una pérdida de energía considerable por el calor remanente que queda almacenado en los ladrillos.
- El uso de una mariposa de control de flujo en la chimenea para controlar el tiempo de residencia de los gases, evitaría la



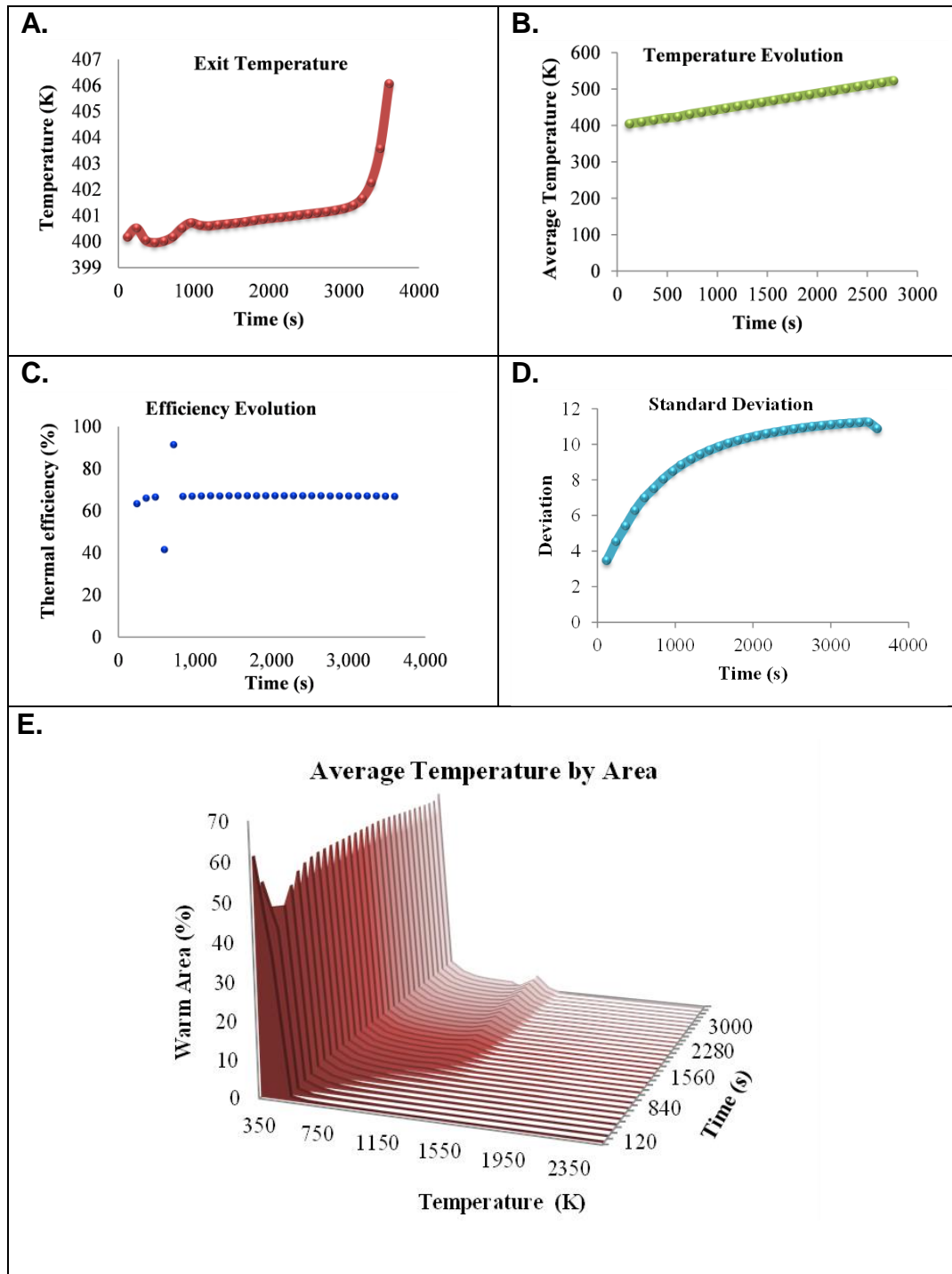
- descarga de gases a altas temperaturas al ambiente.
- Para evitar la pérdida de energía al ambiente, se puede hacer uso de los gases calientes en procesos alternativos.
- Como ya se dijo, el uso de una mariposa de control en la descarga del horno permitiría también aumentar la transferencia de calor al interior del horno como principal consecuencia al aumento de tiempo de residencia de los gases calientes producto de la combustión, haciéndose necesario el uso de menos combustible para su operación.

### **6.3 SIMULACIÓN CASO 1: HORNO CON QUE QUEMADOR, ENTRADA CERRADA Y PISO EN ESPINA DE PESCADO.**

En este segundo escenario el horno a simular cuenta con exactamente las mismas características definidas para el Caso Base, solo que esta vez su entrada se encuentra completamente cerrada al ambiente, y aire que entra al artefacto proviene de un quemador que entrega una corriente a alta temperatura directamente a la cámara de combustión que se encuentra vacía. La Figura 34 muestra un horno que cuenta con puertas en las entradas del emparrillado que se cierran para proceso de cocción, similar a lo que se simuló en esta nueva instancia.

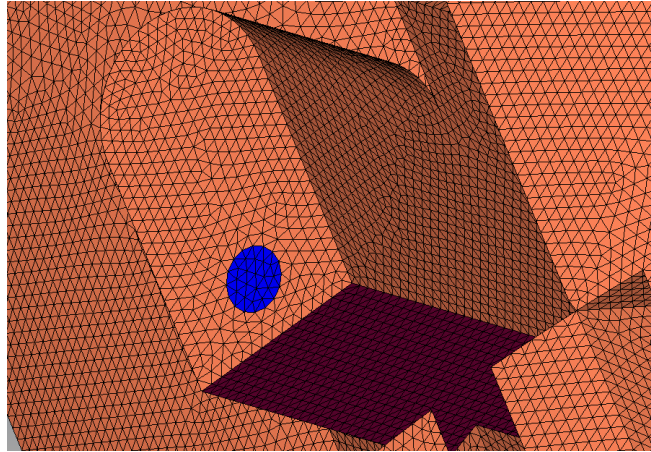


**Figura 34.** Horno Ladrillero tipo colmena con stoker y puertas.



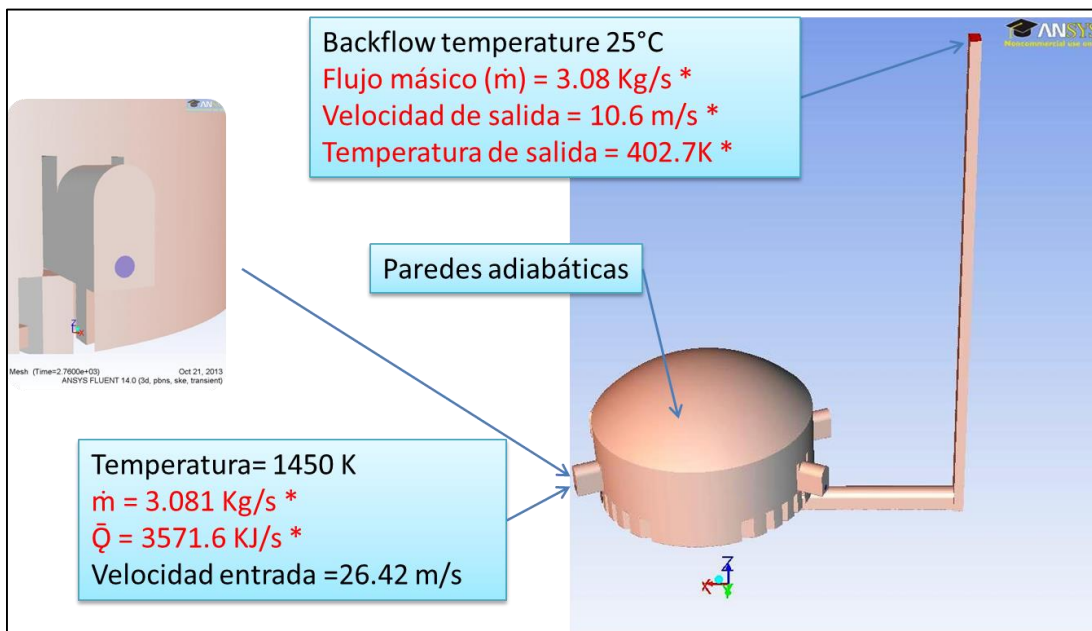
**Tabla 3.** Diagramas de resultados para el Caso Base.

**6.3.1 Mallado.** El despliegue de la malla en este caso conto con todas las consideraciones enunciadas en la sección mallado para el Caso Base. La única diferencia la constituye el mallado de la entrada del horno como se observa en la Figura 35, donde el acople tubular típico de un quemador define una circunferencia como la entrada de aire.



**Figura 35.** Malla de la entrada (azul) y pared del horno (curuba).

**6.3.2 Condiciones de simulación.** La Figura 36 muestra las condiciones de operación dispuestas para el Caso 1.



**Figura 36.** Condiciones de la simulación Caso 1. En rojo la información obtenida después de la simulación.

Con el fin de obtener semejanza no solo en sus características geométricas si no también entre sus condiciones de operación, de tal forma que los resultados obtenidos entre el Caso Base y el Caso 1 fueran comparables; fue necesario determinar que parámetro o parámetros simulados en el primer escenario eran reproducibles para esta nueva simulación. En este caso solo necesario hacer uso del flujo másico para mantener dicha analogía.

Con el propósito de mantener que la cantidad de aire insuflado al interior del horno en el Caso 1 fuera igual a la del Caso Base; y debido a que en esta ocasión el área de la entrada varió y no se cuenta con una superficie irradiante de calor sino que la energía térmica es llevada directamente por el fluido entrante al horno, fue necesario hacer cálculos para mantener dicha similitud. Dichos cálculos fueron:

De los resultados del Caso base se tiene que,

$$\dot{m} = 3,080856 \frac{kg}{s} = \rho * v * A \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde,

$\rho$ =Densidad del aire en la Base de datos de Fluent=  $1,225 \frac{kg}{m^3}$

$v$ = Velocidad de entrada

$A$ = Area de la entrada Caso 1 =  $0,09521 m^2$

Por lo tanto la velocidad que proporcionara una entrada de masa de aire por unidad de tiempo similar a la del caso base es,

$$v = 26,4148 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 16})$$

Como última medida y con la finalidad de que al realizar el precalentamiento del aire, condición de funcionamiento del aun no simulado Caso 2, se alcanzara la misma tasa de calor transferido en el Caso Base ( $\dot{Q} = 5560,079 \text{ kW}$ ). Se supuso que el Caso 1 debería de tener una rata de energía en forma de calor menor a esta, por ello se tomó una temperatura que al reemplazarla en la ecuación de la primera ley de la termodinámica (Ec. 17) para este tipo de artefactos, arrojará un valor de  $\dot{Q}$  inferior al arriba mencionado.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_E - T_R) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde,

$$\dot{m} = \text{Flujo másico de Aire} = 3,080856 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C_p = \text{Calor específico del aire en la base de datos de Fluent} = 1,00643 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_R = \text{Temperatura de referencia} = 300 \text{ K}$$

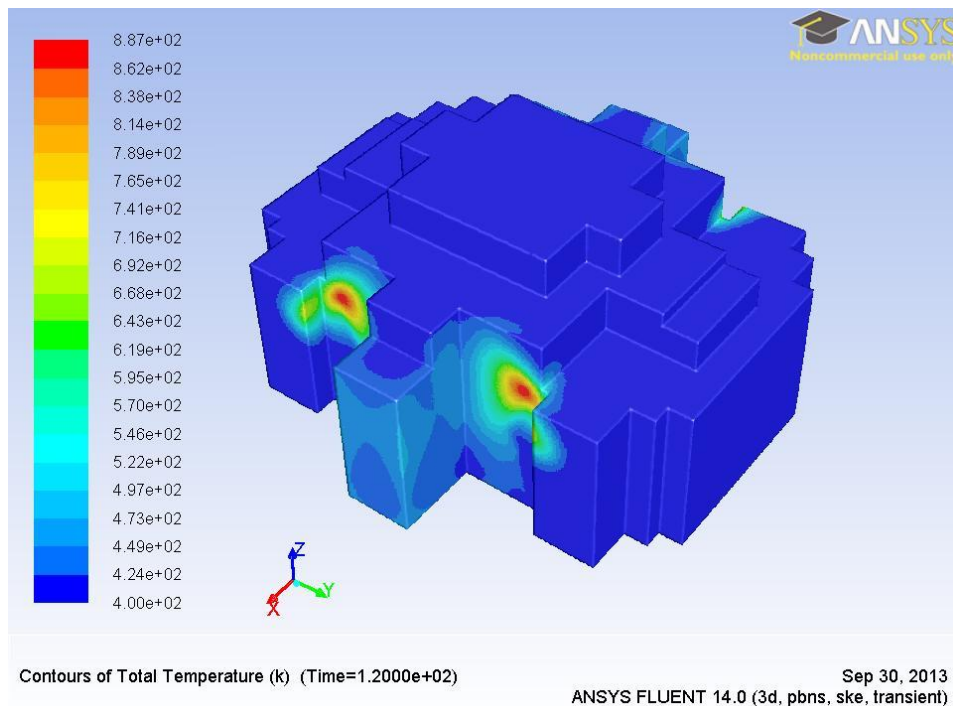
$$T_E = \text{Temperatura a la entrada asumida a conveniencia} = 1450 \text{ K}$$

Por lo tanto,

$$\dot{Q} = 3565,7232 \text{ kW} \quad (\text{Ec.18})$$

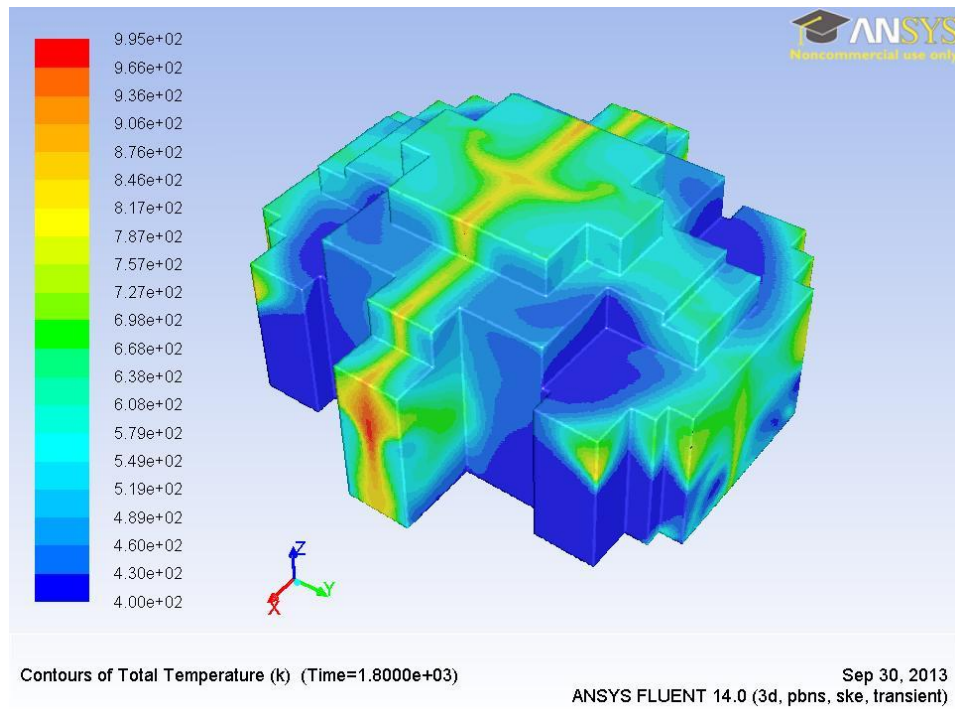
El Valor Calculado en la Ecuación 18 difiere del que se ve en la Figura 36, pues la metodología para definir los parámetros de operación varió del caso anterior a este, el calor transferido no permanece constante con respecto al tiempo como en el escenario de estudio inicial sino que fluctúa alrededor de los 3500 kW.

**6.3.3 Posprocesamiento.** Los Contornos de temperatura obtenidos en la simulación del Caso 1 se muestran a continuación.

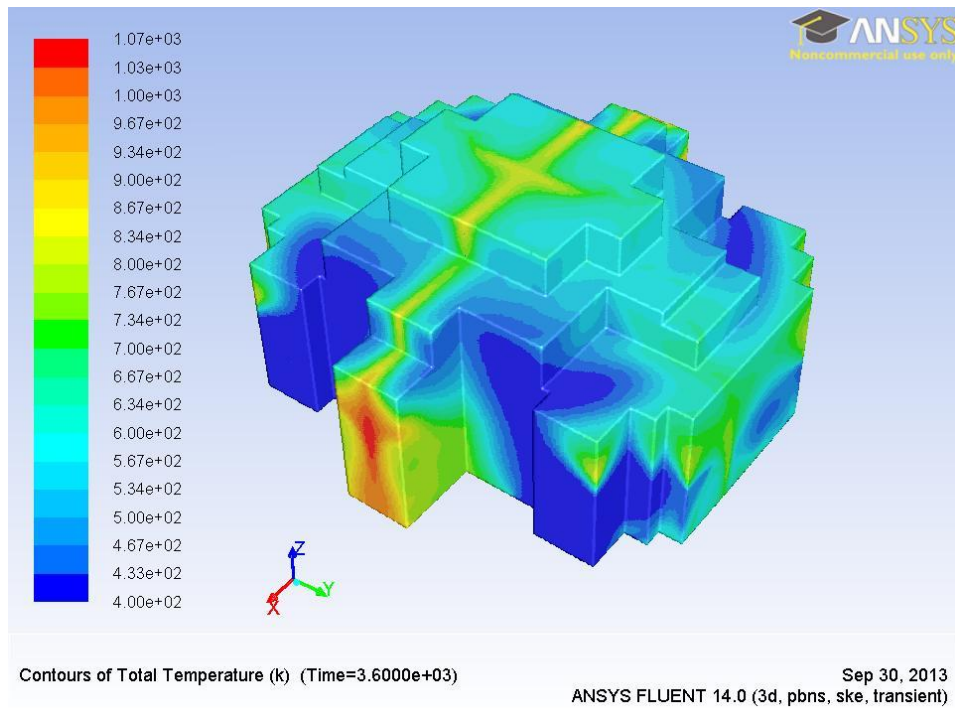


**Figura 37.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 120 segundos de operación del horno.



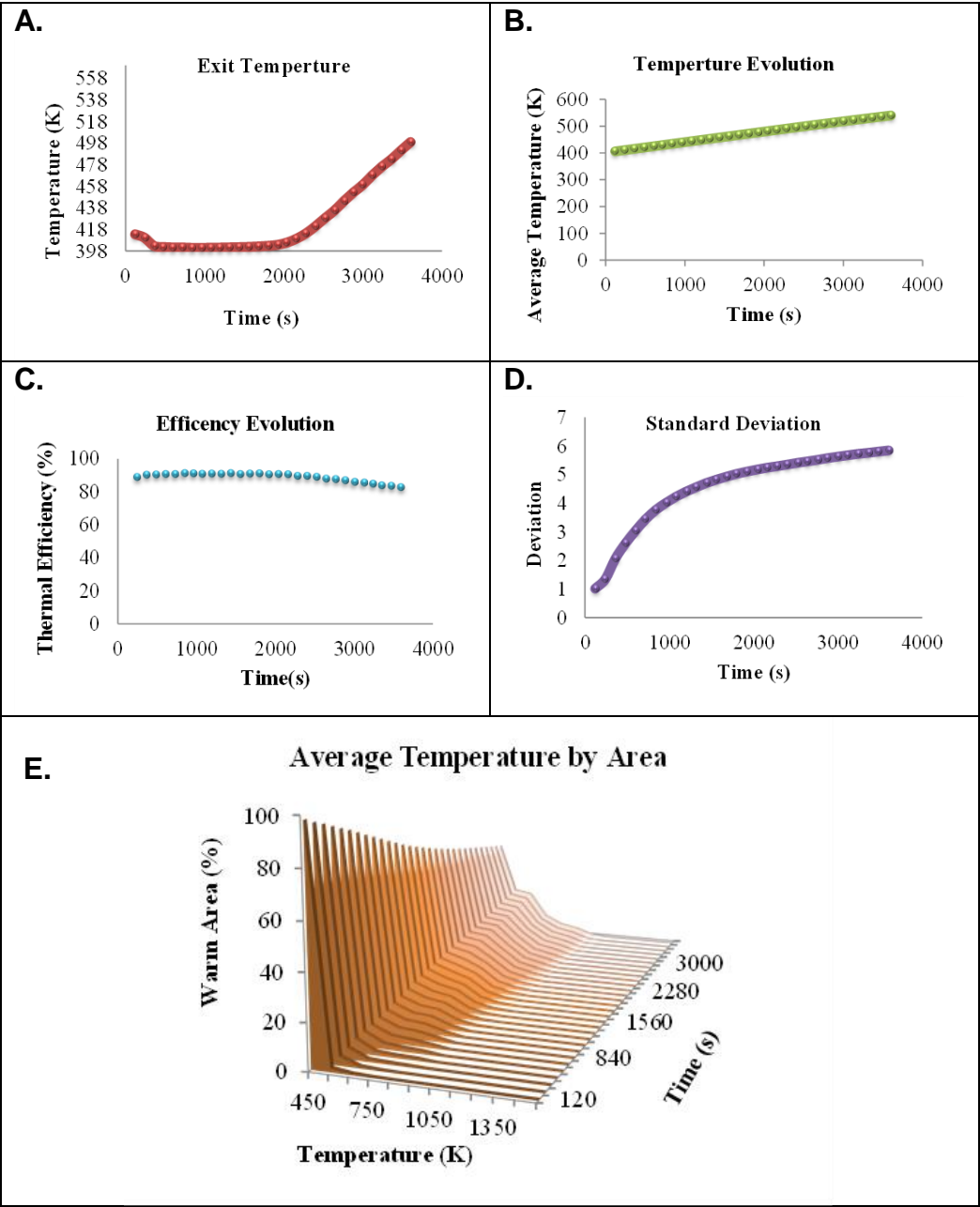


**Figura 38.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 1800 segundos de operación del horno.



**Figura 39.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 1 a 3600 segundos de operación del horno.

La Tabla 4 contiene los diagramas de resultados para el Caso 1. Para estos se utilizó la misma base teórica que en el Caso Base haciendo uso de la Macro desarrollada en Microsoft Excel con Nombre “2-Caso 1” observable en el recurso digital Carpeta Macros.



**Tabla 4.** Diagramas de resultados para el Caso 1.

**6.3.4 Análisis de resultados.** De este segundo escenario de simulación es pertinente afirmar que:

- El uso de un quemador como método para insuflar aire caliente al interior del horno eleva la eficiencia térmica del horno alrededor de un 20% con respecto a la evidenciada anteriormente en el Caso Base, es decir que alcanzo valores que rondan el 80%.
- La masa porosa lo largo de la simulación se calentó más uniformemente pues se utilizaron menos intervalos de clase para el cálculo de la dispersión (Véase Macro desarrollada en Microsoft Excel con Nombre “2-Caso 1” observable en el recurso digital Carpeta Macro), la cual a su vez presento índices hasta de 3 unidades por debajo de lo ocurrido en el Caso Base, es decir la cocción de los ladrillos ocurre de manera más pareja bajo estas condiciones de operación.

#### **6.4 SIMULACIÓN CASO 2: HORNO CON QUE QUEMADOR, ENTRADA CERRADA, PISO EN ESPINA DE PESCADO Y RECIRCULACION DE GASES.**

Este tercer escenario de simulación corresponde a la reutilización de los gases de la combustión que salen a altas temperaturas por la chimenea, para precalentar el aire que se dispone a ingresar al quemador de tal forma que este alcance mayores temperaturas a la entrada del horno sin que sea necesario el uso de más cantidad de combustible en esta última máquina.

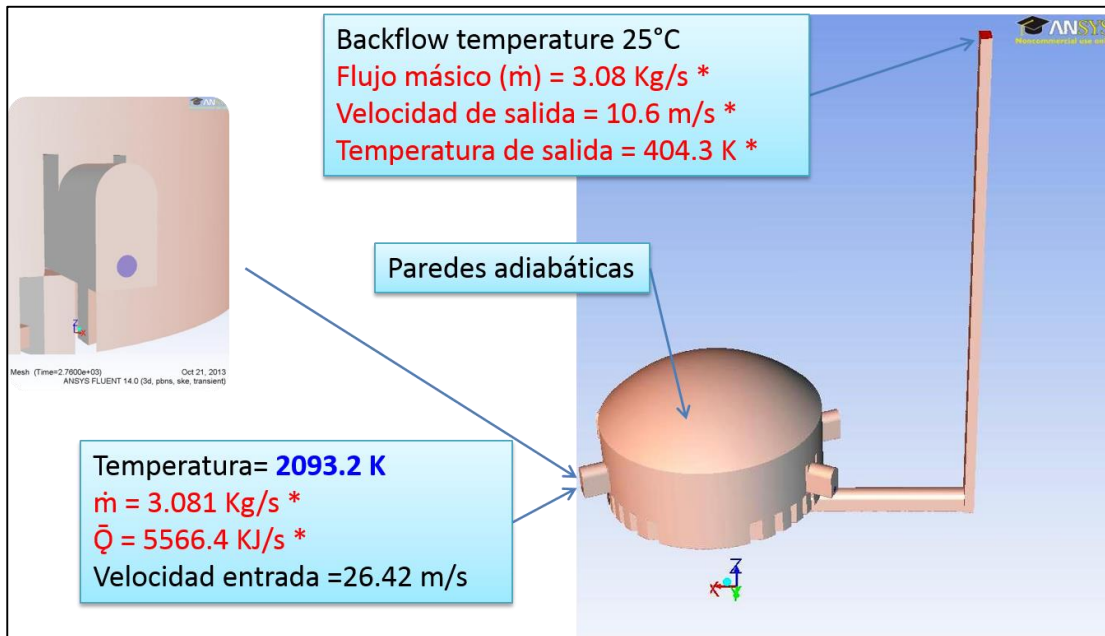
En este caso las únicas variaciones con respecto al Caso 1 radican en el cálculo de la temperatura a la que entraría el aire al horno, puesto que el resto de parámetros de simulación se mantienen constantes con respecto al caso inmediatamente anterior.

**6.4.1 Mallado.** La malla utilizada para esta simulación, corresponde a la misma distribución utilizada para el Caso 1.

**6.4.2 Condiciones de simulación.** La Figura 40 muestra las condiciones de operación correspondientes al Caso 2.

Al igual que en el Caso 1. Se buscó conservar los parámetros que salvaguardaran la similitud entre simulación para así realizar posteriores comparaciones entre los diferentes casos.





**Figura 40.** Condiciones de la simulación Caso 2. En rojo la información obtenida después de la simulación.

Con la velocidad ya calculada en la Ecuación 16, en este caso como ya se había enunciado antes busca que por medio del precalentamiento del aire a ser insuflado se alcance una magnitud de  $\dot{Q}$  tan igual como sea posible al conseguido por el modelo planteado en el Caso Base, de tal forma que se calculó una temperatura a la cual debía entrar el aire para poder alcanzar dicha de tasa de energía. Este procedimiento se ejecutó haciendo uso de la Ecuación 17.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_E - T_R) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde,

$$\dot{Q} = 5560,079 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = \text{Flujo másico de Aire} = 3,080856 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

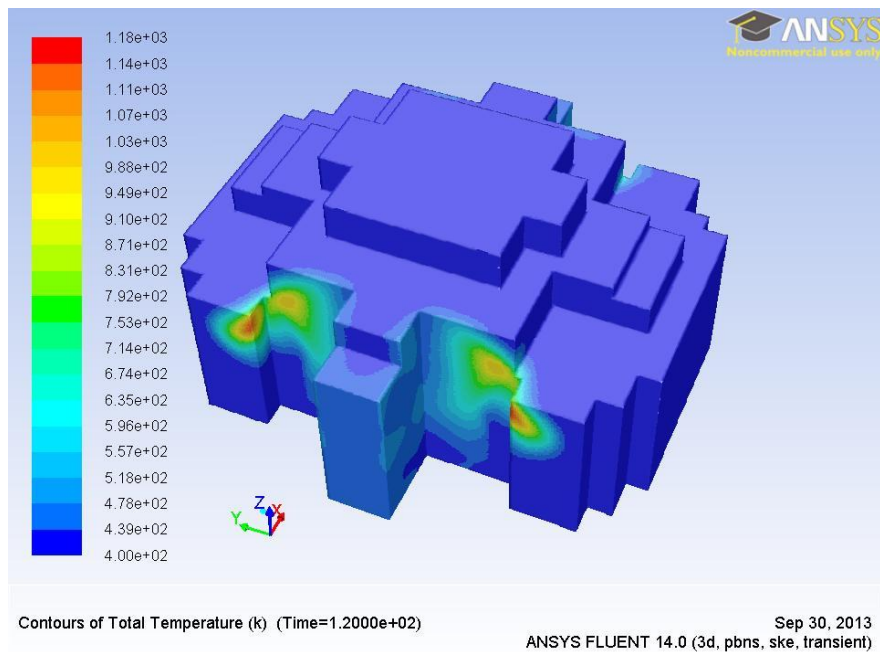
$$C_p = \text{Calor específico del aire en la base de datos de Fluent} = 1,00643 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_R = \text{Temperatura de referencia} = 300 \text{ K}$$

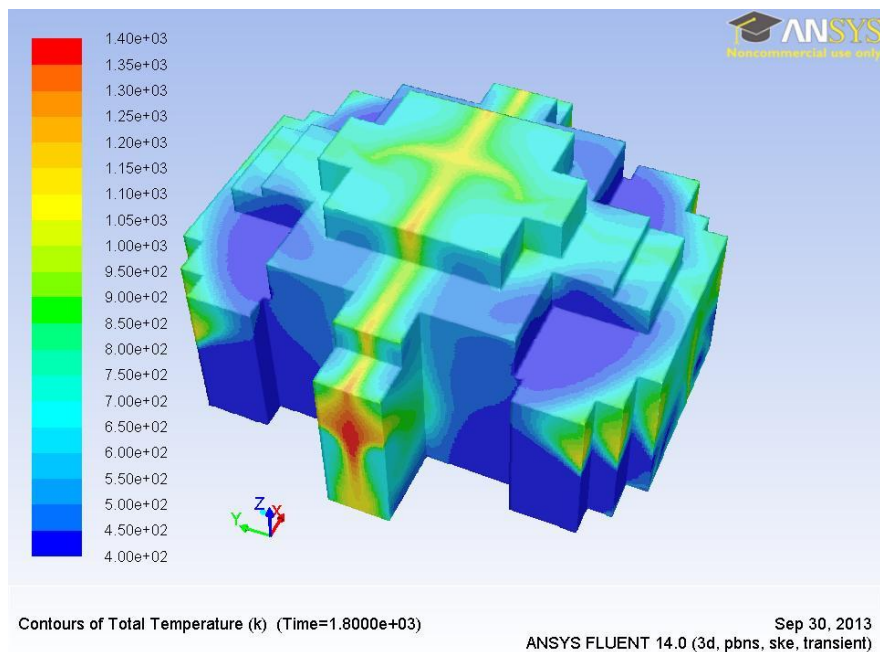
Por lo tanto,

$$T_E = 2093.2 \text{ K} \quad (\text{Ec. 18})$$

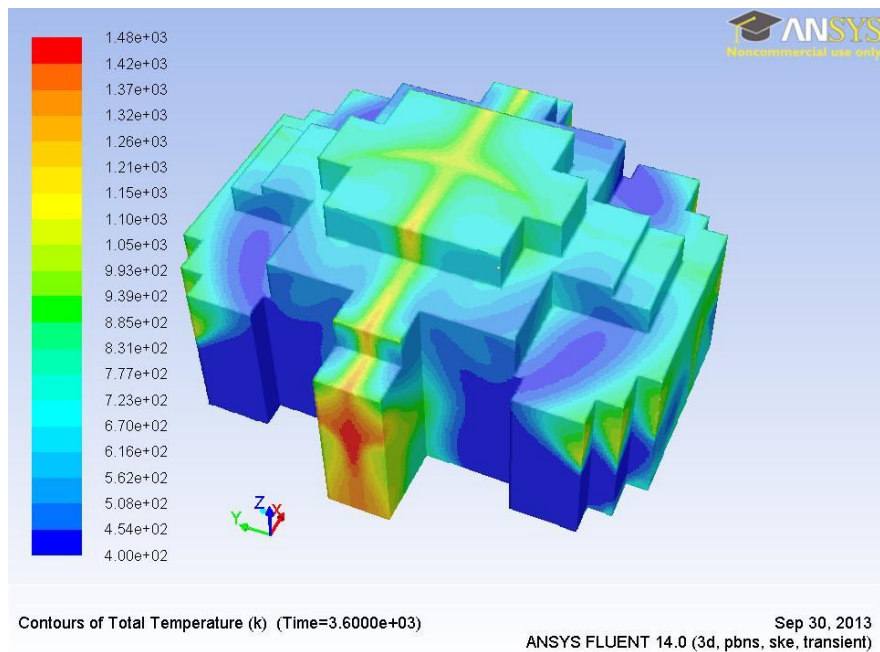
**6.4.3 Posprocesamiento.** Los Contornos de temperatura obtenidos en la simulación del Caso 2 se muestran a continuación.



**Figura 41.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 120 segundos de operación del horno.



**Figura 42.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 1800 segundos de operación del horno.

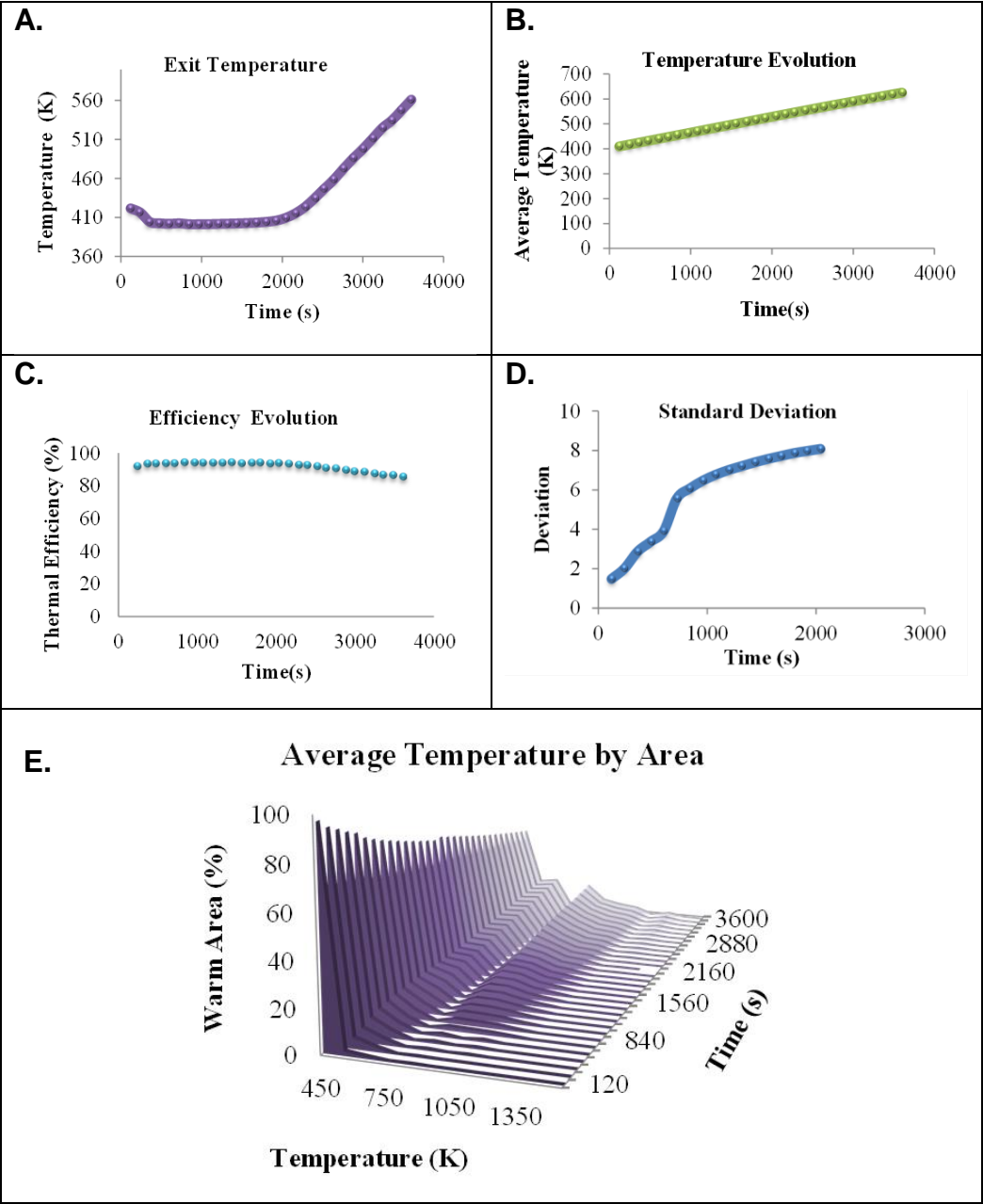


**Figura 43.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 2 a 3600 segundos de operación del horno

**6.4.4 Análisis de resultados.** Preliminarmente en comparación con los casos anteriores, es posible sacar algunas conclusiones con respecto al Caso 2.

- La reutilización de los gases de escape como método para precalentar el aire que es insuflado hacia el interior hasta el momento ha sido la condición de operación que mejores resultados a arrojado pues como se evidencia en la Tabla 5.A su eficiencia térmica ronda el 90%, entregando la misma cantidad de calor por unidad de tiempo que el Caso Base, es decir un 30% más de aprovechamiento de la energía.
- A pesar de que la dispersión para este escenario de simulación con recirculación de gases fue mayor que la arrojada en los resultados del Caso 1, Esta continua siendo menor con respecto a la calculada para el Caso Base. Lo que reafirma que el uso de un quemador como método para soplar aire caliente hacia el interior del horno, a pesar de que se lleve a temperaturas más altas, contribuye a una cocción más uniforme de la carga.

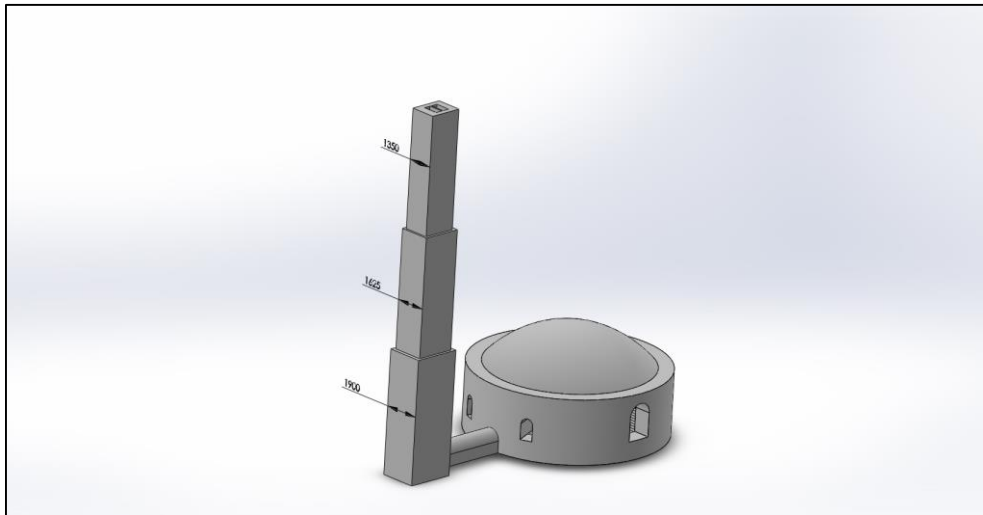
A continuación la tabla que contiene los diagramas de resultados para el Caso 2. Dichos valores fueron calculados haciendo uso de la macro desarrollada en Microsoft Excel con Nombre “3-Caso 2” observable en el recurso digital Carpeta Macros.



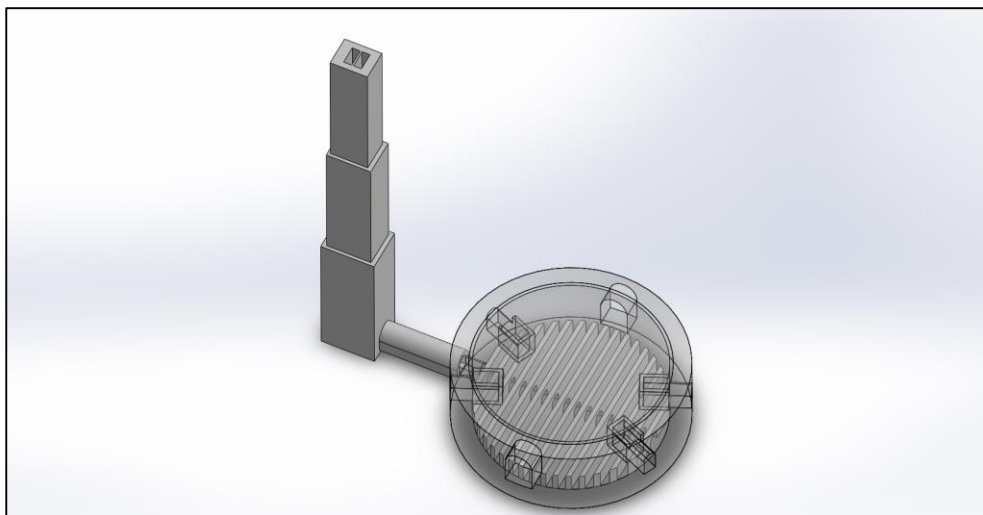
**Tabla 5.** Diagramas de resultados para el Caso 2.

### 6.5 SIMULACIÓN CASO 3: CASO BASE CON DISTRIBUCION DE PISO UNIFORME Y SALIDA LATERAL

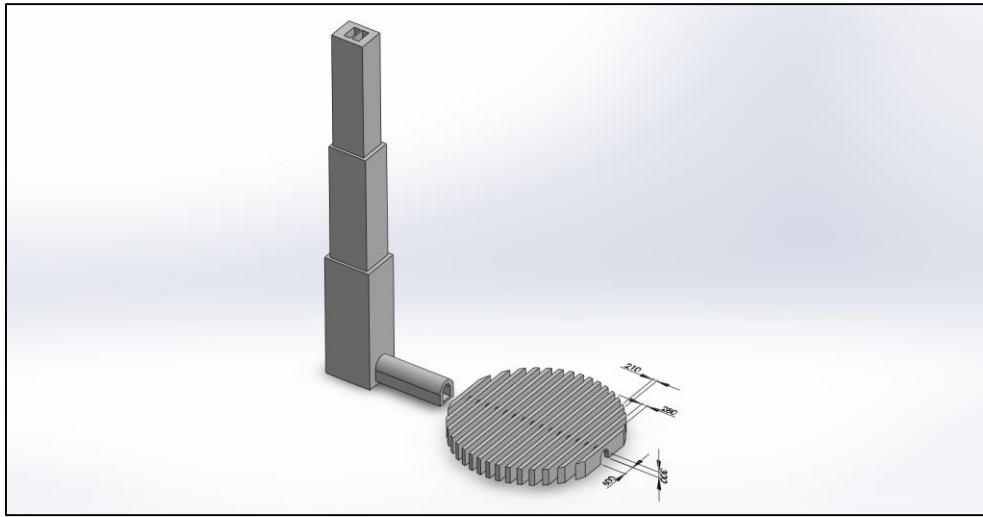
En este último escenario de simulación se buscó evaluar una nueva configuración para el piso del horno. Esta, a pedido de CAIA ingeniería tenía debía tener paredes rectas y paralelas todas entre sí en su base, y adicionalmente se debía disponer el acople de la chimenea a un costado del horno y no centran como se venía trabajando en las anteriores simulaciones. De la Figura 44 a la Figura 46 se observa el modelo CAD con esta nueva geometría.



**Figura 44.** Modelo CAD del Horno para el Caso 3 con acople lateral hacia la

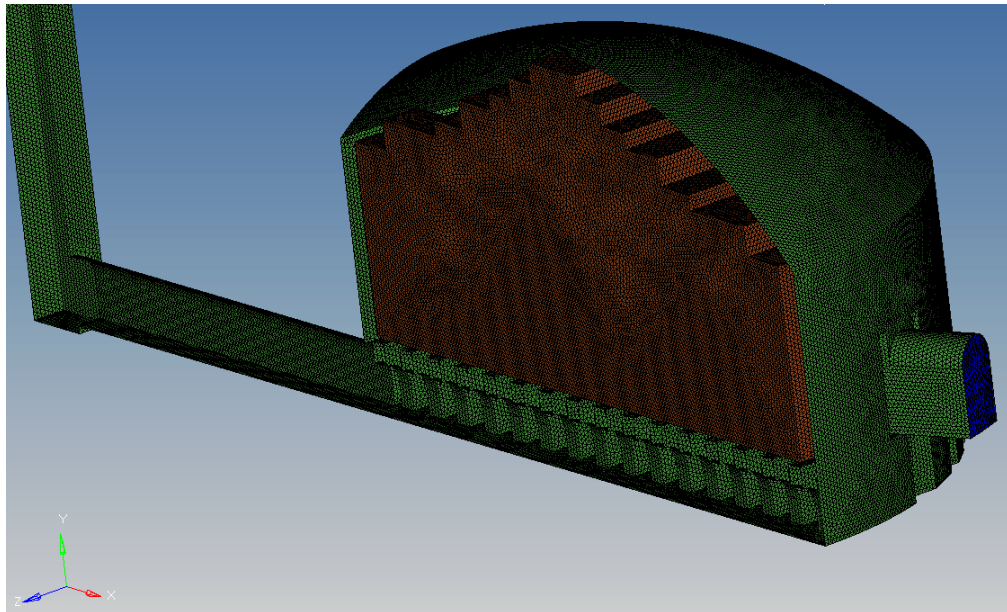


**Figura 45.** Modelo CAD del Horno para el Caso modificación en piso base.



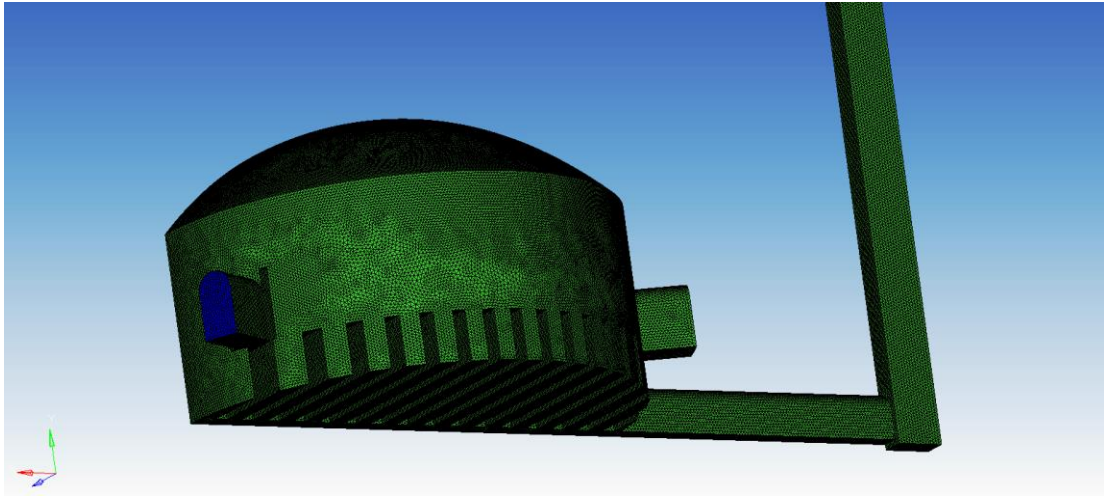
**Figura 46.** Modelo CAD de la chimenea Lateral y variación de piso para el Caso 3.

**6.5.1 Mallado.** Para esta simulación el mallado contó con exactamente las mismas características del Caso Base, incluyendo el uso de la herramienta *boundary layer*, pues se dispone a ser simulado con las mismas condiciones de operación que dicho caso inicial de estudio y así poder llegar a futuras conclusiones contrastando sus correspondientes resultados. A continuación se muestran las imágenes del mallado para el Caso 3.



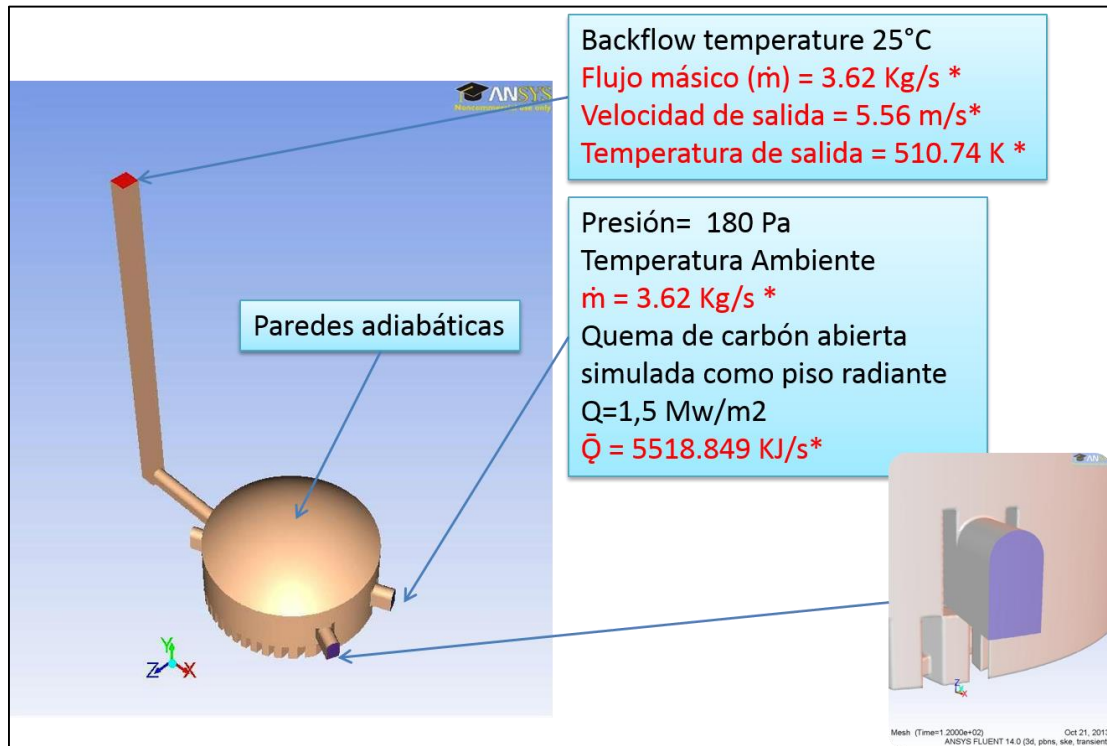
**Figura 47.** Mallado del Horno y la masa porosa para el Caso 3





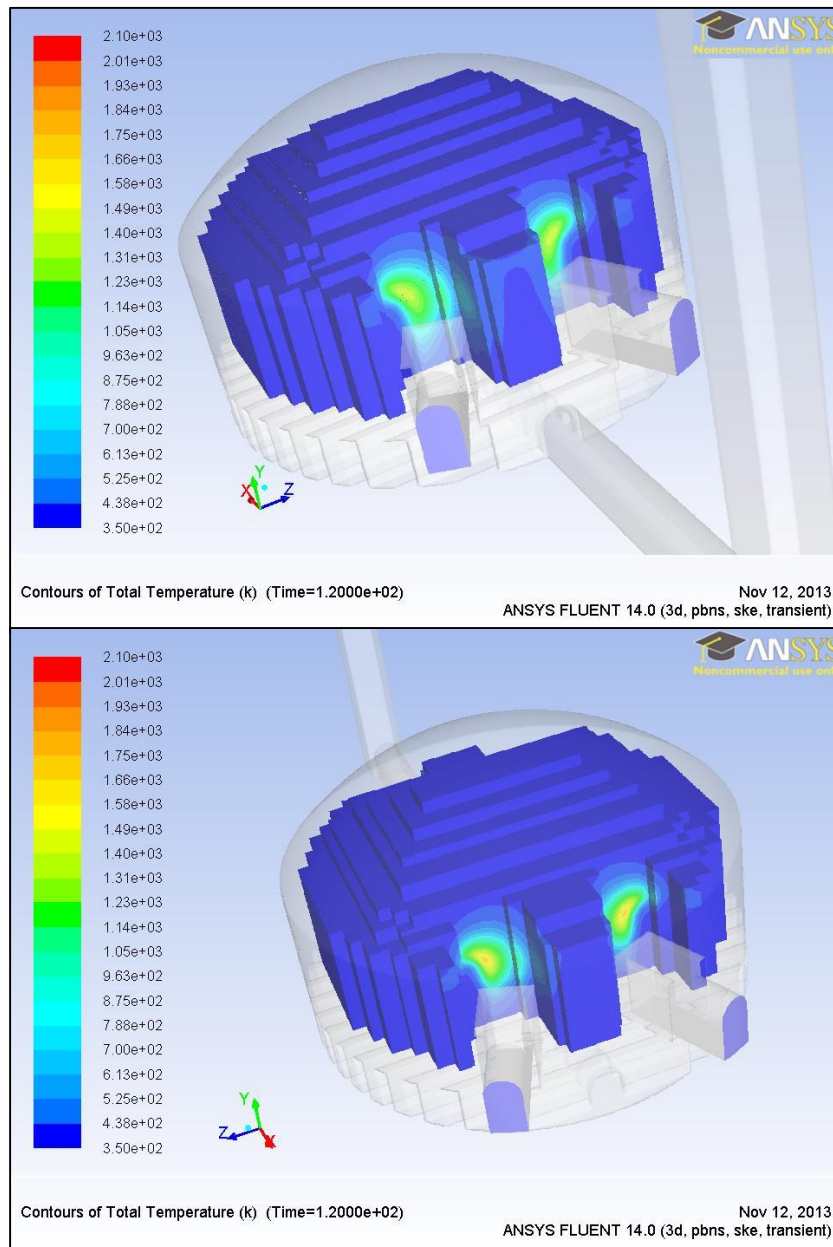
**Figura 48.** Mallado del Horno para el Caso 3.

**6.5.2 Condiciones de simulación.** Los parámetros para poner en marcha este nuevo son visibles en la Figura 49.



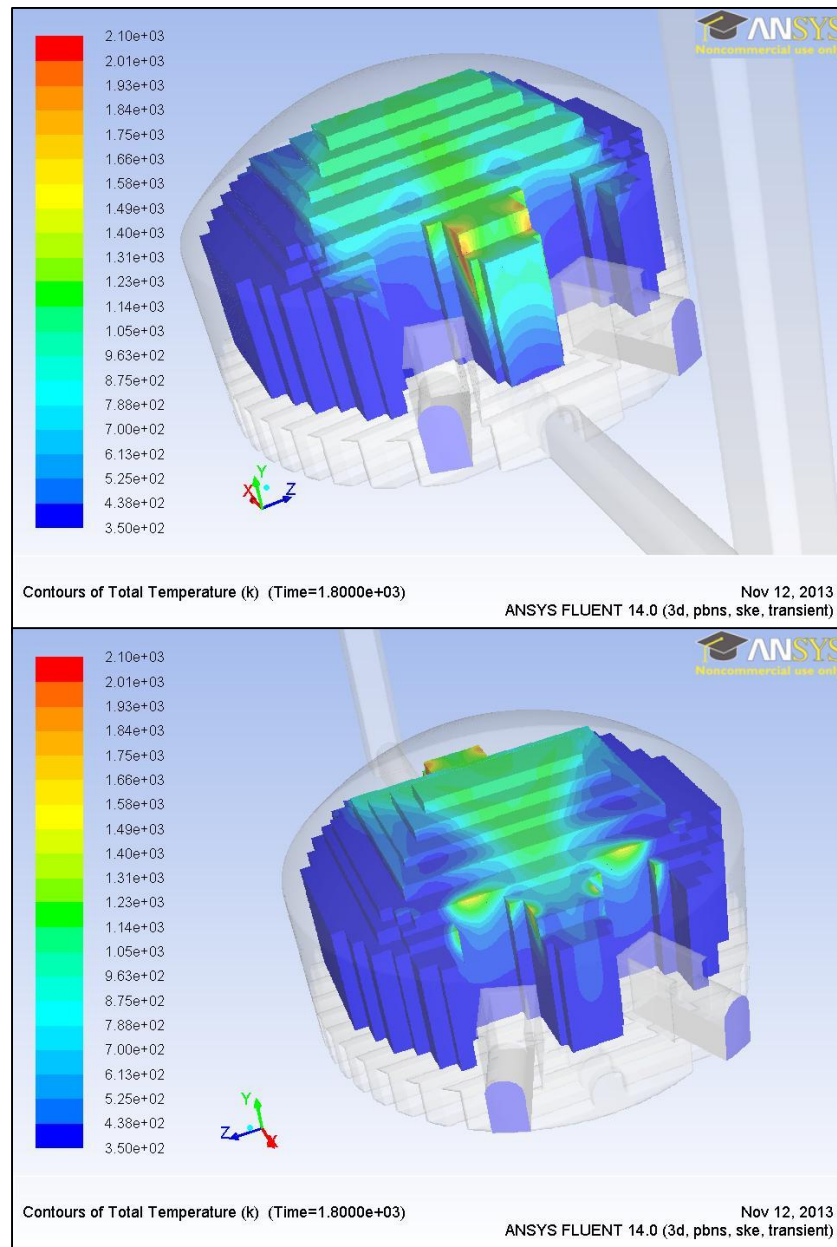
**Figura 49.** Condiciones de la simulación Caso 3. En rojo la información obtenida después de la simulación

La idea para el Caso 3 era reproducir exactamente las mismas condiciones de operación que el Caso Base, sin embargo en la Figura 49 dichos parámetros de funcionamiento difieren de los correspondientes a los del primer escenario de estudio (Figura 30), esto debido a que durante el mallado hubo inconvenientes que hicieron que el área de entrada al horno no fuera igual en los dos casos y por ende los resultados después de la simulación variaran.



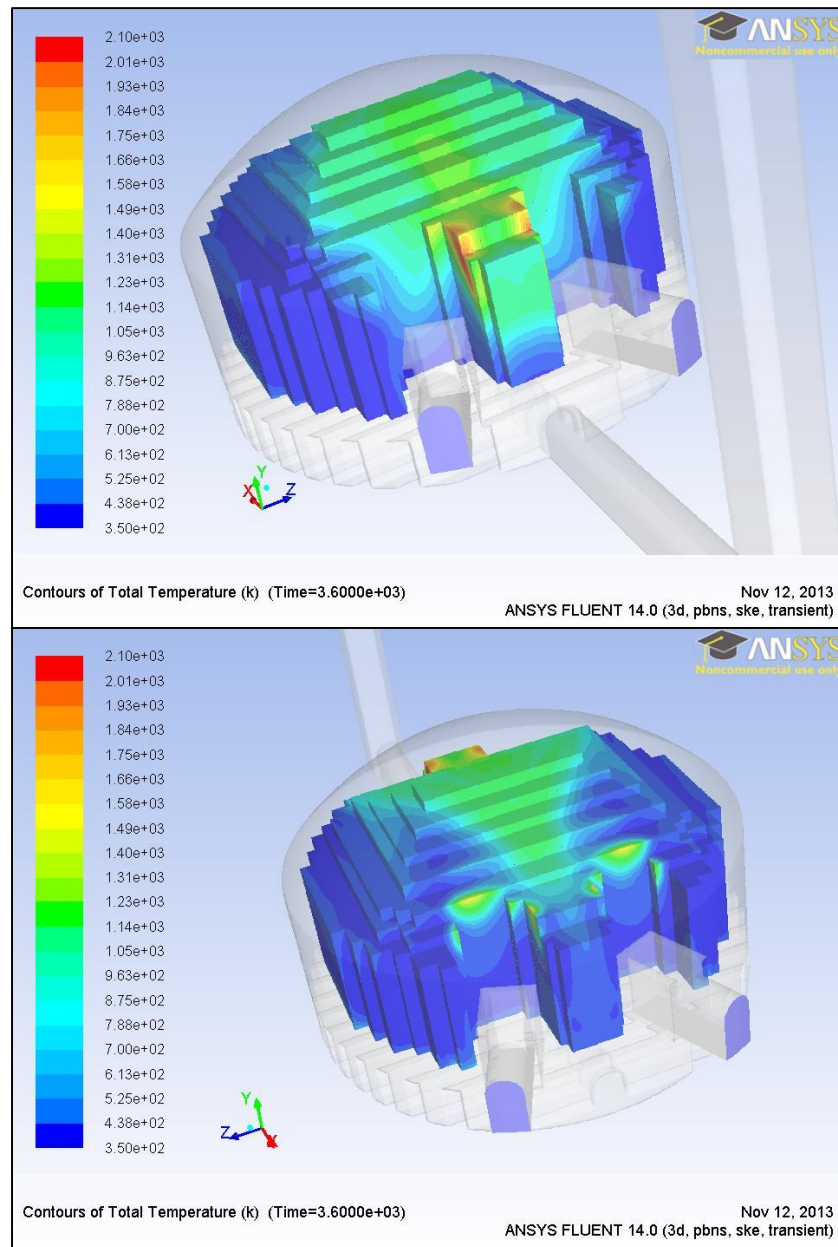
**Figura 50.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 120 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo).





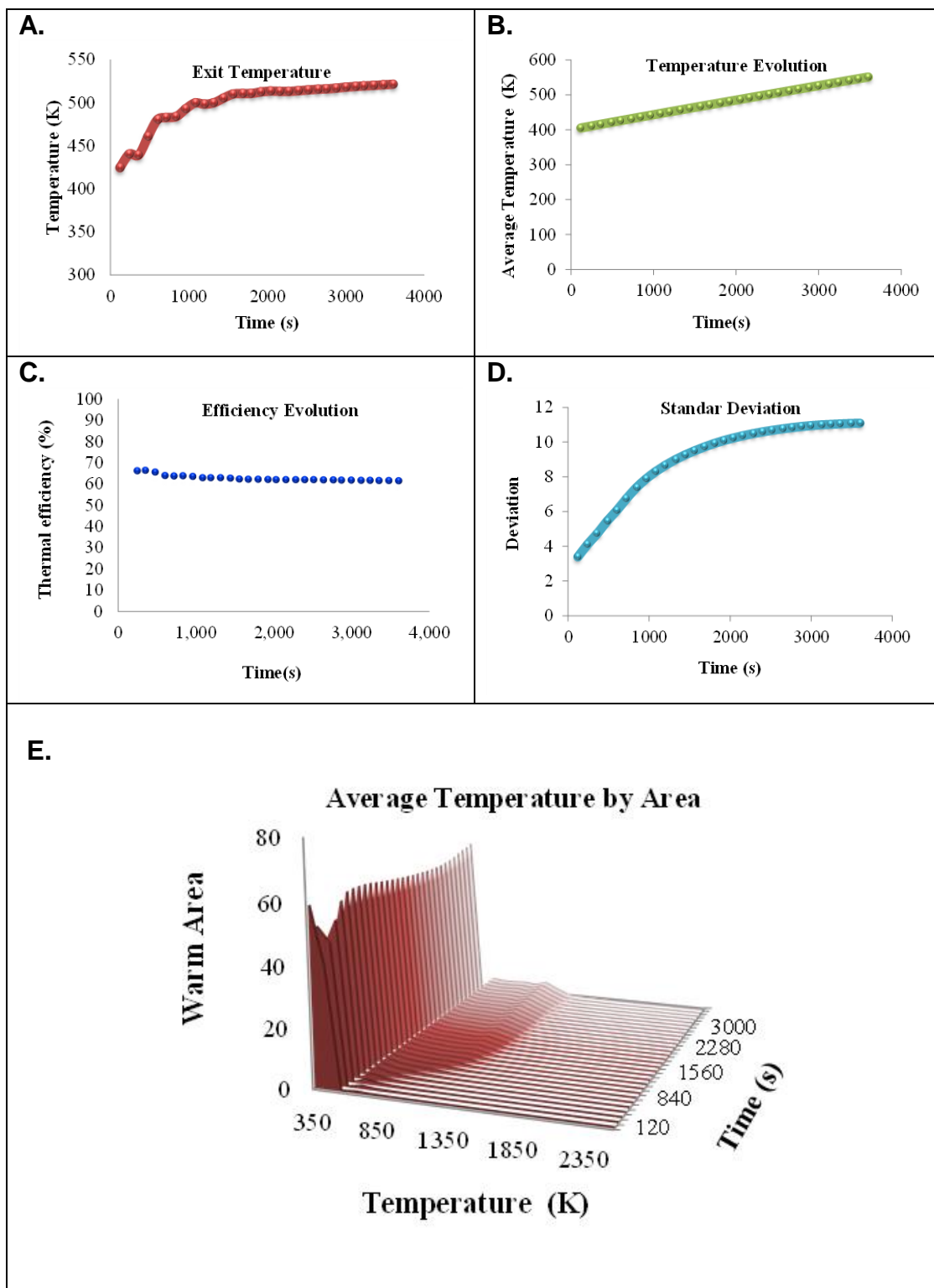
**Figura 51.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 1800 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo).

**6.5.3 Posprocesamiento.** Los contornos de temperatura obtenidos para la masa porosa en este caso se pueden ver de Figura 50 a la Figura 52. Para este caso fue importante señalar la ubicación de la salida de los gases de escape, pues al no estar ubicado mostro un régimen de calentamiento atípico al visto en los anteriores casos.



**Figura 52.** Contorno de temperatura en Kelvin para la masa porosa del Caso 3 a 120 segundos de operación del horno. Lado de la chimenea (arriba), costado contrario (abajo).

La Tabla 6 muestra los resultados de la modelación, en donde se observa que a pesar de la asimetría del calentamiento visible en los contornos de temperatura anteriores, respecto del Caso Base no hay un incremento en la eficiencia térmica general, esta se comporta de igual manera que en el primer contexto de modelado.



**Tabla 6.** Diagramas de resultados para el Caso 3.

**6.5.4 Análisis de resultados.** Contrastando los resultados arrojados por Fluent para esta simulación en comparación con el Caso Base es pertinente afirmar.

- El ubicar la salida hacia la chimenea a un costado del horno en vez de la configuración característica del piso en “espina de pescado” produce una cocción asimétrica de los ladrillos, dando como resultado al final de proceso a la obtención de producto en diferentes niveles de secado.
- Dicha disposición de salida también generó un mayor desperdicio de energía al ambiente ya que como se puede observar en la Tabla 3.A, la temperatura de los gases a la salida del horno es mucho más alta que en el Caso Base, pues parte del aire caliente no alcanza a entrar en contacto con la masa porosa y sale directamente hacia la chimenea por la forma en que se encuentra construido el artefacto.
- Ni la distribución del piso, Ni la nueva ubicación de la chimenea concibió variación en la eficiencia térmica del proceso para cuando la entrada está abierta el ambiente con una superficie que emite calor, esta se comportó igual que en el Caso Base, arrojando valores alrededor del 60%.

Esta fue la última simulación realizada. A continuación con base en lo anteriormente expuesto y sintetizando la información recolectada de todos los modelos estudiados, se dispuso a hacer la toma de decisiones concerniente a las condiciones de operación que cumplieran con los objetivos propuestos al inicio de este proyecto. Dicha elección se enuncia en el capítulo siguiente.

## 7. CONCLUSIONES

- Sin duda alguna los parámetros operación que mejores resultados presentaron, corresponden a las comprendidas por el Caso 2, donde la reutilización de los gases de escape para precalentar el aire previo a ser insuflado al interior del horno, elevó en un 30% en rendimiento térmico original. Además la totalidad de los parámetros estudiados para el Caso 2, superan ampliamente los vistos por el resto de los escenarios. Ejemplo de esto es el calentamiento uniforme de la masa porosa gracias a la distribución de piso en “espina de pescado”.
- Las Condiciones de operación más pobres corresponden al Caso 3. El cual, a pesar de que logra mantener su valor de eficiencia térmica igual al del Caso Base, este hornea asimétricamente la carga y desperdicia demasiada energía, gracias a que su geometría es propensa a que gran parte del calor arrastrado por el aire proveniente de la atmosfera se vaya directamente al ducto que lleva hacia la chimenea.
- El simplificar el modelo de estudio y desarrollar una metodología de modelado basada en experiencias de cómputo anteriores, permitió entrar a analizar puntualmente lo más relevante para la elección de un artefacto térmico, el rendimiento energético. Consiguiendo así que el tiempo de las simulaciones que inicialmente superaban los 8 días, fueran trabajadas en lapsos de tiempo de entre 3 o 4 días. Cada corrida tomó como máximo 4 días continuos de cómputo usando computación en paralelo con 4 procesadores.
- El uso de Software CAD como lo es SolidWorks, contribuyó altamente a cumplimiento de los objetivos de este proyecto, pues su amplia gama de herramientas para modelar en 2D y 3D permitieron reproducir la geometría del horno conforme a como este luce en la realidad.
- La usanza del método de elementos finitos como metodología de solución a problemáticas ingenieriles relacionadas con la mecánica de fluidos que permitan la implementación de software pre y posprocesamiento como los son Hypermesh y Fluent, disminuyen los costos de investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías, pues a largo plazo este tipo de simulaciones fluidodinámica harán innecesario la construcción de prototipos o la realización de modificaciones al tanteo para evaluar comportamientos, como lo fue en este proyecto.

## 9. RECOMENDACIONES

- Seria pertinente para próximas investigación a fines con la temática relaciona con la eficiencia energética en ladrilleras artesanales que hagan uso de hornos del tipo bóveda, determinar el consumo de combustible y que cantidad de recirculación de gases es necesaria para obtener un aumento en los rendimientos térmicos de los hornos como los alcanzados en esta investigación y conforme ella generar ideas de negocio que puedan beneficiar económica y medioambientalmente tanto a la industria ingenieril, como a los empresarios y dueños de dichas ladrilleras
- Mantener el convenio entre el grupo de investigación GENERGÉTICA de la Universidad Tecnológica de Pereira y el CIMA del Tec de Monterrey Campus Toluca, resulta altamente beneficioso para los estudiantes que nuestra institución pues la exposición a este tipo de experiencias académicas, hace más competentes a los ingenieros de nuestra Universidad para una industrial profesional que cada día exige más experticia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Caro Bellido, *Diccionario de Términos Cerámicos y Alfarería*, BREOGAN. Cádiz, España, 2008, p. 267.
- [2] Equipo Tenico EELA Colombia, “Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera,” pp. 1–14, 2011.
- [3] ANALFIT, “Diagnóstico de la Industria Ladrillera Nacional.” Bogotá, Colombia, 2002.
- [4] Pisos y Enchapes los Vados S.A.S, “TEJAR LOS VADOS LA PASION DEL GRES.” [Online]. Available: <http://www.tejarlosvados.net/>. [Accessed: 18-Nov-2014].
- [5] J. Lechuga, “Programa de eficiencia energética en ladrilleras artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático. En: INE Memorias del Taller sobre políticas públicas para Mitigar Impacto Ambiental de Ladrilleras Artesanales (Sesión IV. Experiencias).” Guanajuato, México, 2012.
- [6] Regeneración(Ltda.), “Estudio tecnológico para definir el tipo de tecnología de horno apropiada para la reconversión de las ladrilleras artesanales , ingeniería básica y supervisión del montaje .” Nemocón, Colombia, p. 100, 2011.
- [7] INT, “Evaluación del desempeño térmico de un horno ceramico tipo bóveda.” Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1–23, 2011.
- [8] INT, “Evaluación comparativa de la Inyección de aire forzado para combustión en la quema de artefactos cerámicos en horno caipira.” Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1–17, 2011.
- [9] Equipo Tenico EELA Colombia, “HORNO COLMENA TRADICIONAL – LADRILLERA CERAMICA HONDAVE.” Nemocón, Colombia, pp. 1–8.
- [10] J. M. Tizón Pulido, “Seminario de Simulación Numérica en Sistemas de Propulsión,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2005.
- [11] D. F. Prato Sánchez, “Modelación de la Dispersión de Material Particulado en Zona Minera del Cesar, Colombia, Usando FLUENT (CFD).,” Universidad EAN, 2012.
- [12] ANSYS Inc.(USA), “ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide,” *ANSYS Inc., USA*, vol. 14.0, no. November, p. 826, 2011.
- [13] “Miliarium, Ingenieria Civil y Medio Ambiente.,” 2008. [Online]. Available: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>.
- [14] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. New York, EE. UU.: W. H. Freeman and Company, 1983, p. 500.

- [15] Grupo Termotecnia, "Análisis del sistema de ventilación de un secadero solar mediante tecnica fluidodinámica computacional," Universidad de Sevilla, 2012.
- [16] E. Mayorga and T. Sánchez, "Uso eficiente de la energia en la produccion de ladrillos a pequeña escala," *Programa Energía ITDG- Perú*.
- [17] P. R. A. L. PRAL, "Experiencias en el sector ladrillero artesanal en las ciudades de arequipa y cusco." Perú, pp. 1–16, 2008.